

近接覚を用いた反射動作に基づく ハンド・アーム統合制御による把持

小山 佳祐

電気通信大学 大学院 情報理工学研究科
博士（工学）の学位申請論文

2017年3月

近接覚を用いた反射動作に基づく
ハンド・アーム統合制御による把持

博士論文審査委員会

主査 明 愛国 教授

委員 下条 誠 特命教授

委員 横井 浩史 教授

委員 金子 正秀 教授

委員 田中 一男 教授

委員 長井 隆行 教授

著作権所有者

小山 佳祐

2017

Reactive grasping by integrated control of hand and arm using proximity sensor

Keisuke Koyama

Abstract

For grasping an object by a robot hand, pose (position and orientation) error between the hand and the object greatly affects success rate. Usually vision sensors and tactile sensors are used for detecting the pose error. However, vision sensors have occlusion problem when the object and the hand are close. And tactile sensors cannot detect the object until touching. Thus, lack of information near the object occurs, and the hand cannot grasp the object by appropriate grasping configuration. To solve the problem, few researchers have proposed to detect the pose error before touching using a proximity sensor. Because the proximity sensor can detect the pose error to the object from the hand surface directly, appropriate grasping configuration can be realized based on the error information. Some case studies on the grasping by simple hands such as under-actuated hand have been implemented. To realize more robust and efficient grasping for complicated objects, grasping by a hand with multiple degrees of freedom (multiple fingers and multiple actuated joints for each finger) using the proximity sensor is necessary. However, up to now there is no trial to control a hand with multiple degrees of freedom and an arm using the proximity sensor. In this thesis, an architecture for integrated

control of the hand with multiple degrees of freedom and the arm using proximity sensors is proposed to realize robust and efficient reactive grasping. This architecture is with high-speed response, and the change of software is unnecessary for different objects, since it directly controls joints of the hand and the pose of the arm tip using the sensor outputs.

First, a design of the proximity sensor for the fingertip is described and the developed prototype of the sensor suitable for orientation and distance control of the hand is introduced. Second, a method to control each joint of the fingers using the sensor for pre-grasp is proposed. Third, a method for calibrating the sensor output during approaching to the object to improve the output robustness to different reflectance rates. By grasping experiments, it is confirmed that adjustment for the fingertips orientation and distance, or the velocity of contact with respect to objects such as paper, plastic, metal, and etc can be realized. Fourth, the integrated control of the hand and arm for reactive grasping using the proximity sensor is described. By experiments, it is confirmed that it is possible to control each finger of the hand and the tip of arm for grasping both static objects and moving objects suitably. Finally, the conclusion is given and future works are discussed.

概要

ロボットハンドによる把持・操作では，視覚と触覚の組み合わせが一般的に用いられる．しかしながら，ハンドと物体が近い位置関係にあるとき，視覚からは対象物が見えず，また，接触するまでは触覚センサは機能しないため，情報欠落が生じる．そこで，近接覚を用いてハンド表面から物体の位置を直接センシングすることで，適切な把持位置に修正する手法が提案されている．ただし，従来研究は平行グリッパや劣駆動ハンドなど，比較的，低自由度のエンドエフェクタを対象としており，多指多関節ハンドとアームを統合的に制御する試みは行われていない．

本論文では近接覚により多指多関節ハンドとアームを統合的に制御する方式を提案し，高速な把持位置・姿勢修正の動作を実現する．この方式はセンサ出力により，直接，ハンド関節とアーム手先位置・姿勢を制御することから，反射型把持 (reactive grasping) の一種であり，応答速度が速く，物体ごとにソフトウェアの変更が不要であるという特徴を持つ．

この統合制御の実現にあたって，指先部の近接覚センサの素子配置設計や，統合制御システムの構築，物体形状に倣って指先配置を調整するためのプリグラスプ制御，物体表面の反射率に依存しない把持制御，および，ハンド関節8自由度とアーム手先6自由度の統合的な制御方式を提案した．本論文は以下に示す全9章から構成され，その内容の要旨は以下のとおりである．

第1章 緒言

第1章では，まず，本研究を行う背景として，自動化が求められている作業を紹介し，位置・姿勢，形状や重量，摩擦係数が未知の対象物を自律的に把持するハンドの必要性について説明する．次に，視覚，触覚，近接覚センシングに基づく把持研究例を挙げ，視覚・触覚センシングのみに基づく把持で生じる情報欠落と把持速度の低下の問題を指摘し，近接覚の導入により，把持の確実性と高速性を向上できることを述べる．次に，近接覚を用いた把持の関連研究を紹介し，これまでに多指多関節ハンドとアームを近接覚のみで制御する試みが取り組まれていることについて言及する．この上で，本論文では多指多関節ハンドとアームの統合制御方式を提案し，高速な把持位置・姿勢調整動作を実現することが目的であることを述べる．そして，この統合制御方式と各章の内容との関連について明確にする．

第2章 ロボットアーキテクチャの変遷と分類

第2章では、本論文で提案する統合制御方式の特徴や位置づけを明確にするために、ロボットアーキテクチャの変遷を述べ、これらを分類し比較を行う。そして、従来の近接覚・触覚を用いた制御では、平行グリップ等の低自由度のハンドのみを対象としているのに対し、本論文では多自由度のハンドとアームの統合制御を可能としている点が異なることを述べ、本研究の新規性と有用性を明確にする。

第3章 指先部近接覚センサの設計

第3章では、ハンドとアームの統合制御方式を実現するにあたり、まず、物体面の傾きと距離検出に適した指先部近接覚センサの設計を行う。具体的には、指先に実装する近接覚センサの素子配置角度や間隔を調整することで、物体面の傾き検出感度の向上と、指先姿勢に依存しない距離計測特性を実現する。このための素子配置パラメータを考案し、光学シミュレーションにより、パラメータ調整によるセンサ出力特性変化を検証することで、適切な検出素子配置を決定する。

第4章 指先部近接覚センサによる傾き・距離検出特性

第4章では、新たに開発した指先部近接覚センサによる物体面の傾き・距離検出特性を実験により検証する。まず、標準反射板におけるセンサ出力特性から、3章の素子配置パラメータ調整の効果を検証し、次に色、模様、材質、形状の異なる物体面の傾き・距離検出実験により、対象物表面での光の反射特性がセンサ出力に与える影響を明らかにする。

第5章 ハンド・アーム統合制御システム

第5章では、近接覚センサ出力を基に、ハンドとアームを高速リアルタイム制御するためのシステムの構築を行う。まず、各ハードウェアと制御器の接続関係を明示し、ハンドとアームの外観と主な仕様、センサ計測回路の詳細について述べる。次に、複数の近接覚センサ間での光の干渉を防止するためのセンサLEDの点灯制御を紹介し、また、アームの運動学的な特異点近傍での制御について説明する。以上の工夫により、第6～8章の実験において正しくセンサ出力を計測し、ハンドとアームを安定かつ高速に制御可能なシステムを構成する。

第6章 プリグラブ制御

第6章では、指先部近接覚センサの出力に基づき、物体形状に倣って指先配置を調整するための制御方式について説明する。センサ出力を目標値として直接、関節角度を駆動する反射型制御を提案し、実験により指先と物体の初期位置を変化させた際の応答特性や収束位置等を検証する。なお、ここでは物体表面の光の

反射率は既知として制御目標値を設定することとし，未知反射率の物体への適用を可能とする制御方式は第7章で述べる．

第7章 物体表面の光の反射率によらない把持制御

第7章では，物体表面の光の反射率に依存しない1)絶対位置制御と2)相対速度制御を提案し，これらを応用した把持について述べる．両方式ともにアクティブセンシングを利用したものであり，反射率推定のための新たなセンサの導入が必要ないという長所がある．まず，1)絶対位置制御では，指先の相対移動距離とセンサ出力変化率から，反射率を推定することで，物体面に対し指先位置を一定に調整する手法を提案する．また，この手法により各指を一定距離に配置することで，全指同時接触での把持が可能となることを実験で示す．次に，2)相対速度制御では，鳥などが飛行制御の際に用いる衝突までの残り時間推定(Time-to-contact)を用いた反射率によらない制御方式を提案する．そして実験により，果物やぬいぐるみ，プラスチック製のおもちゃ等に対し，物体に依存しない把持が可能か検証する．

第8章 ハンドとアームの統合制御

第8章では，物体形状に倣うハンド各指の制御に加えて，さらにアーム手先位置・姿勢も同時に調整する反射型制御を導入することで，ハンドとアームの統合制御方式を実現する．この方式では，ハンドとアームの制御は独立・並列して実行されるが，ハンド関節角度とアーム手先位置・姿勢が相互に作用することで，ハンドとアームの協調動作による把持位置・姿勢修正を可能としている．実験では，テーブル面に置かれた対象物への把持位置・姿勢修正や人が手で持ってランダムに移動させる物体への追従が可能か検証した．

第9章 結論と今後の展望

第9章では，本研究の成果，結論をまとめ，今後の課題，展望について述べる．

目次

1	序論	1
1.1	背景	1
1.2	劣駆動・柔軟素材ハンド	3
1.3	視覚・触覚センシング	5
1.4	近接覚センシング	6
1.4.1	関連研究	7
1.5	研究目的	17
1.6	論文構成	17
2	ロボットアーキテクチャの変遷と分類	21
2.1	初期のロボットアーキテクチャ	22
2.2	モデル規範型アーキテクチャ	24
2.2.1	モデル規範型アーキテクチャに基づく把持制御	25
2.3	行動規範型アーキテクチャ	28
2.3.1	サブサンプリングアーキテクチャ	28
2.3.2	生物模倣型アーキテクチャ	30
2.3.3	反射型アーキテクチャ	31
2.4	まとめ	36
3	指先部近接覚センサの設計	37
3.1	触・近接覚統合型ハンド	38
3.1.1	近接覚センサの回路構造と計測原理	39
3.1.2	近接覚センサを用いた物体面の傾き検出 ^[44]	41
3.2	指先形状の設計	43
3.3	センサ実装領域の設定と検出素子の選定	43

3.4	近接覚センサの素子配置設計	49
3.5	まとめ	62
4	指先部近接覚センサによる傾き・距離検出特性	63
4.1	実験装置と測定条件	63
4.2	標準反射板でのセンサ出力特性	73
4.2.1	位置出力 x_c, y_c の傾き検出特性	73
4.2.2	距離出力 I_{all} の検出特性	77
4.2.3	ピッチ角と距離出力 I_{all} の関係	78
4.2.4	過渡応答特性	78
4.3	物体面の反射特性・形状がセンサ出力に与える影響	83
4.3.1	位置出力 x_c, y_c の傾き検出特性	83
4.3.2	距離出力 I_{all} の検出特性	86
4.4	まとめ	90
5	ハンド・アーム統合制御システム	91
5.1	多指ロボットハンド	93
5.1.1	ハンドパラメータ	97
5.2	ロボットアーム PA10	98
5.3	近接覚センサ計測回路	103
5.4	制御器	107
5.4.1	dSPACE	107
5.4.2	ハードウェア構成	107
5.4.3	ソフトウェア構成	111
5.5	近接覚センサのLED点灯制御	115
5.6	ハンド制御	117
5.7	PA10アーム制御	121
5.7.1	拡張ヤコビ行列を用いた手先速度制御	122
5.7.2	特異点適合法による減速制御	124
5.8	まとめ	129

6	プリグラスプ制御	131
6.1	センサ出力と関節の対応関係	131
6.1.1	指先姿勢・距離の変化に対する各関節の寄与度	133
6.1.2	干渉制御方式	139
6.1.3	独立制御方式	140
6.2	2種類の制御方式の応答特性評価実験	141
6.3	距離・ピッチ角・ロール角の同時調整実験	162
6.4	実際の対象物に対するプリグラスプ実験	170
6.5	分散して配置した制御器によるプリグラスプ実験	172
6.6	まとめ	180
7	物体表面の光の反射率によらない把持制御	181
7.1	絶対距離制御	181
7.1.1	反射率推定手法	182
7.1.2	近似式のパラメータ同定と誤差評価	186
7.1.3	近似式の誤差評価	190
7.1.4	絶対距離推定の誤差評価	201
7.1.5	全指同時接触での把持実験	207
7.2	相対速度制御	211
7.2.1	Time-to-contact(TTC)の計測原理	211
7.2.2	把持制御への応用	212
7.2.3	TTCを用いた把持実験	220
7.3	まとめ	225
8	ハンドとアームの統合制御	227
8.1	アーム手先位置・姿勢の制御方式	228
8.2	把持位置・姿勢の修正実験	233
8.2.1	静止物体に対する実験	234
8.2.2	動的物体に対する実験	236
8.3	まとめ	238

9	結論と今後の展望	239
9.1	本研究による成果	239
9.2	今後の研究展開	241
9.2.1	遠隔操作への応用	242
9.2.2	視覚と近接覚の組み合わせ	242
	謝辞	245
A	抵抗回路網式近接覚センサ：センサ出力計算式の導出	257
A.1	ネット状近接覚センサの構造	257
A.2	測定原理	257
A.2.1	電流分布の中心位置とその総和	257
A	PA10アームのモータドライバとの通信仕様	265
A.1	ARCNET通信	265
A.2	ARCNET通信ケーブルと配線図	266
A.3	PA10アーム制御の状態遷移と制御コマンド	267
A.3.1	概要	269
A.3.2	制御コマンドCに関する詳細	272
A.3.3	PA10アーム制御の状態遷移	273

目 次

1.1	Amazon picking challenge ^[1]	2
1.2	Under-actuated hands (gripper type and multi-finger type) ^[2, 3, 4]	2
1.3	Grasping procedure of the jamming gripper	4
1.4	Grasping strategy based on a vision, a proximity and a tactile sensor	6
1.5	Proximity sensors for remote operating robot system ^[21, 22]	7
1.6	Tactile/proximity sensor modules (The modules can be mounted on a whole body of a humanoid robot) ^[23]	8
1.7	Detection of an object features and grasping of dishes by active grouping using optical proximity sensors (photoreflectors) ^[29]	11
1.8	Reactive grasping of common objects using optical proximity sensors (pho- toreflectors) and a reactive controller ^[30]	12
1.9	(Upper)Adjustment of grasping position to an object placed on a desk surface, (Lower) An object transfer operation between the robot and a human using electric-field sensors (capacitive type) ^[31]	14
1.10	Transparent object detection using sea-shell effect pretouch sensor ^[33]	15
1.11	6D proximity servoing using tactile/proximity sensor (capacitive type) ^[34] .	15
1.12	Composition of this thesis	18
1.13	Flow of this research	19
2.1	Classification of robot architecture	22
2.2	(Left) tortoise (behavior-based architecture), (Right) Shakey (model-based architecture) ^[57]	23
2.3	NASREM architecture (Model-based) ^[57]	24
2.4	Overview of model-based architecture in grasping	25

2.5	Force closure grasping using a four-finger hand (in two dimensional plane)	26
2.6	Internal structure of Sub-sumption architecture ^[60]	29
2.7	Adjustment of grasping configurations based on sensor-directed control ^[52]	32
2.8	Adjustment of grasping configurations based on State transition control ^[54]	33
2.9	Sensor-directed control for a multi-fingered hand and an arm using proximity sensor outputs (proposed in this thesis)	34
3.1	Design step of a fingertip sensor: (a)Design of a fingertip shape, (b)Area setting of a proximity and a tactile sensor, (c)Design of a layout of the proximity sensor elements	37
3.2	Overview of a 3-finger Robot hand (8 D.O.F) with a tactile/slip sensor and proximity sensor elements (photoreflector)	38
3.3	(a)Overview of Resistor Network Structure Proximity Sensor (RNSPS), (b)Schematic diagram of 3×3 matrix of RNSPS. In this example $m=3, n=3$	40
3.4	Tilt detection of the object's plane based on position output x_c, y_c	42
3.5	Tilt detection of the object's curvature surface based on position output x_c, y_c	43
3.6	Photo-reflector "EE-SY1200": (a)Overview, (b)Size [mm], (c)Schematic symbol	44
3.7	Light current measurement setup diagram of photo-reflector EE-SY1200	45
3.8	Response time measurement circuit of photo-reflector EE-SY1200	45
3.9	Characteristics between distance and output current of photo-reflector EE-SY1200	46
3.10	LED directionality of photo-reflector EE-SY1200	48
3.11	Ptr. directionality of photo-reflector EE-SY1200	48
3.12	Split calculation on our ray tracing simulator	50
3.13	Schematic diagram of diffuse reflection model	50
3.14	Relationship between an angle δ and position output y_c	52
3.15	Previous fingertip proximity sensor ^[46]	52

3.16 Simulation model used to verify relation between sensor outputs x_c , I_{all} and the angle δ	53
3.17 Simulation result of position output x_c (relation with the angle δ)	53
3.18 Simulation result of distance output I_{all} (relationship with the angle δ)	54
3.19 Parallel connection of photo reflectors	54
3.20 Simulation model used to verify relation between sensor outputs x_c , I_{all} and number of photo-reflectors	56
3.21 Simulation result of distance output I_{all} (relation with number of photo- reflectors)	56
3.22 Simulation result of distance output I_{all} coefficient of variance vs. an inter element angle Ψ	57
3.23 (a) Overview of the sensor sheet (Flexible board) and the photoreflector, (b) Three-dimensional element placement was realized by sticking the sensor sheet on the fingertip	58
3.24 Schematic diagram of the tactile/slip and the proximity sensor sheet	59
3.25 Design drawing of the tactile, slip and the proximity sensor sheet	60
4.1 The experimental apparatus used for tilts and distance detection of a sur- face of an object	64
4.2 Objects with different colors (from the left, kodak gray card 90% white, red paper, blue paper and black paper)	66
4.3 Objects with different pattern (from the left, painting 1, painting 2 and cookie box)	66
4.4 Objects with different materials (from the left, aluminum plate, felt, glass plate and mirror)	67
4.5 Objects with different shape (from the left, Cylinder $d = 78$ mm, Cylinder $d = 51$ mm, Cylinder $d = 31$ mm, Sphere $\Phi = 50$ mm and Sphere $\Phi = 80$ mm)	67
4.6 Analog and digital processing of proximity sensor outputs for noise reduction	68
4.7 Circuit diagram of the amplifier circuit of voltage outputs V_{S1} , V_{S2} , V_{S3} , V_{S4}	69
4.8 Circuit diagram of the low-pass filter circuit of voltage outputs V_{S1} , V_{S2} , V_{S3} , V_{S4}	71

4.9	Tilt detection characteristic of position output x_c (object: kodak gray card 90% white, distance $d = 0 \sim 10$ mm)	75
4.10	Tilt detection characteristic of position output x_c (object: kodak gray card 90% white, distance $d = 15 \sim 60$ mm)	75
4.11	Tilt detection characteristic of position output y_c (object: kodak gray card 90% white, distance $d = 1 \sim 10$ mm)	76
4.12	Tilt detection characteristic of position output y_c (object: kodak gray card 90% white, distance $d = 15 \sim 60$ mm)	76
4.13	Distance detection characteristic of I_{all} (object: kodak gray card 90% white)	77
4.14	Relationship between pitch angle ϕ and distance output I_{all} (object: kodak gray card 90% white, distance $d = 0 \sim 10$ mm)	79
4.15	Relationship between pitch angle ϕ and distance output I_{all} (object: kodak gray card 90% white, distance $d = 15 \sim 60$ mm)	79
4.16	Relationship between roll angle γ and distance output I_{all} (object: kodak gray card 90% white, distance $d = 0 \sim 10$ mm)	80
4.17	Relationship between roll angle γ and distance output I_{all} (object: kodak gray card 90% white, distance $d = 15 \sim 60$ mm)	80
4.18	Turn-ON characteristic of the voltage output $V_{I_{all}}$	82
4.19	Turn-OFF characteristic of the voltage output $V_{I_{all}}$	82
4.20	Relationship between object colors and characteristic of position outputs x_c, y_c	83
4.21	Relationship between object patterns and characteristic of position outputs x_c, y_c	83
4.22	Relationship between object materials and characteristic of position outputs x_c, y_c	84
4.23	Relationship between object shapes (cylinder) and characteristic of position outputs x_c, y_c	84
4.24	Relationship between object shapes (sphere) and characteristic of position outputs x_c, y_c	85
4.25	Relationship between object colors and characteristic of distance output I_{all}	87

4.26 Relationship between object patterns and characteristic of distance output	
I_{all}	87
4.27 Relationship between object materials and characteristic of distance output	
I_{all}	88
4.28 Relationship between object shapes (cylinder) and characteristic of distance output	
I_{all}	88
4.29 Relationship between object shapes (sphere) and characteristic of distance output	
I_{all}	89
5.1 Connection diagram of hardware of robot hand and arm system	92
5.2 Over view of robot hand(Harmonic Drive Inc.) and arm(PA10-7C, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)	92
5.3 (Right) Overview of robot hand, (Left) Joint configuration of the hand (3-finger, 8D.O.F)	93
5.4 Joint name of 1 finger	94
5.5 Joint number and rotation direction of robot hand	94
5.6 Schematic diagram of geometric parameters of finger	97
5.7 PA10-7C arm joint definition	98
5.8 Link length and movable range of PA10-7C arm	99
5.9 Sensor signal transmission path and amplifier/filter circuit	103
5.10 Comparison plot of the raw AMP output (V_x) and the amp output with noise-cut filters	104
5.11 Comparison plot of the raw AMP output (V_y) and the amp output with noise-cut filters	105
5.12 Comparison plot of the raw amp output ($V_{I_{\text{all}}}$) and the amp output with noise-cut filters	105
5.13 Overview of the controller(dSPACE, Expansion Boxes “PX20”).	107
5.14 Internal structure of DS1005	108
5.15 Overview of dSPACE system	112
5.16 Example of Simulink program	113

5.17	GUI of ControlDesk	114
5.18	Proximity Sensor's LED turn ON/OFF circuit	116
5.19	Step response characteristic of first flexion joint θ_1	119
5.20	Step response characteristic of first flexion joint θ_2	119
5.21	Step response characteristic of first pivot joint θ_p	120
5.22	Schematic diagram of PA10-7C arm control system	121
5.23	Types of singularities of the arm	124
5.24	Joint angular velocity calculation algorithm based on singularity consistent method	127
5.25	(Left) Arm tip velocity control by normal inverse kinematics, (Right) Arm tip velocity control by using singularity consistent method	128
6.1	Schematic diagram of the reactive controller of the hand	131
6.2	Joint D.O.F and fingertip coordinates of each finger	132
6.3	Statics model of finger1 or 3	133
6.4	Relation of pitch angle ϕ and coefficient of jacobian J_{12}/J_{11} (distance $d =$ $0 \sim 10$ mm)	136
6.5	Relation of pitch angle ϕ and coefficient of jacobian J_{12}/J_{11} (distance $d =$ $15 \sim 60$ mm)	136
6.6	Control block diagram of interference control method	139
6.7	Control block diagram of independent control method	140
6.8	Experimental apparatus for pre-grasp	141
6.9	Definition of pitch angle ϕ , roll angle γ and distance d	142
6.10	Three initial positions of finger	144
6.11	Time change of distance and postures in independent control method (Ini- tial position 1)	146
6.12	Time change of sensor outputs in independent control method (Initial po- sition 1)	147
6.13	Time change of distance and postures in interference control method (Initial position 1)	148

6.14 Time change of sensor outputs in interference control method (Initial position 1)	149
6.15 Time change of distance and postures in independent control (Initial position 2)	152
6.16 Time change of sensor outputs in independent control (Initial position 2)	153
6.17 Time change of distance and postures in interference control (Initial position 2)	154
6.18 Time change of sensor outputs in interference control method (Initial position 2)	155
6.19 Time change of distance and postures in independent control method (Initial position 3)	157
6.20 Time change of sensor outputs in independent control method (Initial position 3)	158
6.21 Time change of distance and postures in interference control method (Initial position 3)	159
6.22 Time change of sensor outputs in interference control method (Initial position 3)	160
6.23 (Left)Initial position ($d = 40 \text{ mm}$, $\phi = -45^\circ$, $\gamma = 45^\circ$), (Right)Final position	162
6.24 Time change of distance and postures in independent control ($d = 40 \text{ mm}$, $\phi = -45^\circ$, $\gamma = 45^\circ$)	164
6.25 Time change of sensor outputs in independent control ($d = 40 \text{ mm}$, $\phi = -45^\circ$, $\gamma = 45^\circ$)	165
6.26 Trajectory of fingertip position (independent control method)	166
6.27 Time change of distance and postures in independent control method ($d = 40 \text{ mm}$, $\phi = -45^\circ$, $\gamma = 45^\circ$)	168
6.28 Time change of sensor outputs in independent control method ($d = 40 \text{ mm}$, $\phi = -45^\circ$, $\gamma = 45^\circ$)	169
6.29 Pre-grasp motion to apple and printed-paper box	171
6.30 Overview of proximity sensor feedback loop	173

6.31	Circuit for converting the ratio of analog voltage to PWM signals	174
6.32	Feedback control circuits for one finger using only analog elements	178
6.33	Pre-grasp motion for moving object (using analog feedback circuits)	179
7.1	Reflected light model of 1 photoreflector	182
7.2	Offset distance d_o between photo-reflector and contact surface	185
7.3	Relation between linearization error and multiplier $\frac{1}{n}$	187
7.4	Object: kodak gray card 90% white, linear distance output $I_{all}^{-\frac{1}{n}}$	188
7.5	Object: Kodak gray card 90% white, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve	192
7.6	Object: Red paper, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve	192
7.7	Object: Blue paper, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve	193
7.8	Object: Black paper, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve	193
7.9	Object: Painting 1, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve	194
7.10	Object: Painting 2, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve	194
7.11	Object: Cookie box, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve	195

7.12	Object: Aluminum plate, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve	195
7.13	Object: Felt, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve	196
7.14	Object: Glass plate, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve	196
7.15	Object: Mirror, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve	197
7.16	Object: Cylinder $d = 31$ mm, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve	197
7.17	Object: Cylinder $d = 51$ mm, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve	198
7.18	Object: Cylinder $d = 78$ mm, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve	198
7.19	Object: Sphere $\Phi = 50$ mm, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve	199
7.20	Object: Sphere $\Phi = 80$ mm, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve	199
7.21	Object: Black paper, linear distance output $I_{\text{all}}^{-\frac{1}{n}}$	200
7.22	Object: Glass plate, linear distance output $I_{\text{all}}^{-\frac{1}{n}}$	200
7.23	Object: Mirror, linear distance output $I_{\text{all}}^{-\frac{1}{n}}$	201

7.24	Results of calibration of distance output I_{all} (Objects are kodak gray card 90% white, red paper, blue paper and black paper)	203
7.25	Results of calibration of distance output I_{all} (Objects are painting 1, painting 2 and cookie box)	203
7.26	Results of calibration of distance output I_{all} (Objects are aluminum plate, mirror, felt and glass plate)	204
7.27	Results of calibration of distance output I_{all} (Objects are Cylinder $d = 78$ mm, 51 mm and 31 mm)	204
7.28	Results of calibration of distance output I_{all} (Objects are sphere $\Phi = 80$ mm and 50 mm)	205
7.29	Experimental apparatus for evaluating contact timing of 3 fingers	209
7.30	Result of pre-grasp using sensor output calibration	209
7.31	This graph shows that pressure sensor outputs of the object (carried out the pre-grasp and the grasping of it).	210
7.32	Example of detecting TTC from visual information in the case of a bird.	211
7.33	Block diagram of First Order Adaptive Windowing (FOAW)	214
7.34	Experimental apparatus for detecting $1/\tau$	217
7.35	Objects used in the experiment of detecting $1/\tau$ (kodak gray card 90% white, aluminum plate, felt, red paper, black paper and spheres($\Phi = 50, 80$ mm))	217
7.36	Result of estimating $1/\tau$ at fingertip speed = 30.0 mm/s	218
7.37	Result of estimating $1/\tau$ at fingertip speed = 60.0 mm/s	219
7.38	Grasping target objects (apple, banana, sandwich, plastic toy, paper box, aluminum box, ball, tape, potato, soft toy, glass and black can)	221
7.39	Grasping result of apple and banana (Upper)Initial position of finger and each object, (Middle) contact position to the object, (Lower) fingertip velocity and contact timing (detected by tactile sensor)	222
7.40	Grasping result of sandwich and plastic toy (Upper)Initial position of finger and each object, (Middle) contact position to the object, (Lower) fingertip velocity and contact timing (detected by tactile sensor)	223

8.1	Schematic diagram of the reactive controller of the arm	227
8.2	Position and posture adjustment of the arm tip using sensor output y_c . . .	229
8.3	Position and posture adjustment of the arm tip using joint angles of 2 fingers	230
8.4	Rotation center of the arm tip and offset position $y_{\text{rot.center}}, z_{\text{rot.center}}$	231
8.5	The initial and final position/posture of the fingers and the arm tip	234
8.6	(Left) The table shows a success or failure of the position/posture adjustment, (Right) The table shows the success/failure, the object outline and the initial position of 3 fingers	235
8.7	Position and posture adjustment of the arm tip for moving object	237
A.1	Schematic diagram of basic Resistor Network Structure Proximity(RNSP) sensor (Type with reduced number of resistors)	258
A.2	Coordinate of RNSP sensor output	258
A.1	Pin number of RJ-11	268
A.2	Wiring of ARCNET cable	268
A.3	Data format of ARCNET	271
A.4	PA10 arm servo driver control state transition	272
A.5	control data: from host controller to servo driver	274
A.6	Reply data: from servo driver to host controller	275
A.7	Reply data: table of Serbo CPU status	276
A.8	Reply data: table of communication supervision CPU status	277
A.9	Transmission order and division method of 2/4 bytes data	278

表 目 次

1.1	Response time and detection range of proximity sensors (available or under study as of 2016 ¹⁾)	9
1.2	Undetectable objects and disadvantages of each proximity sensor type . . .	10
1.3	Proximity sensor based approaches for grasping unknown objects	16
3.1	Absolute maximum rating of photo-reflector EE-SY1200	45
3.2	Electrical and optical characteristics of photo-reflector EE-SY1200	46
3.3	Supply voltage, current and resistor value of the fingertip proximity sensor	59
4.1	Names and remarks of objects used in tilts and distance detection experiment	65
4.2	Gains of the amplifier circuit	70
4.3	Resistor values and supply voltages of the amplifier circuit and the sensor .	70
4.4	Characteristics of the low-pass filter circuit	71
4.5	Resistor values and the supply voltages of the low-pass filter circuit	72
4.6	Main specification of digital oscilloscope RTO1014	81
5.1	Specification of flexion joints	95
5.2	Specification of pivot joint	96
5.3	Specification of motor driver of robot hand	96
5.4	Geometric parameters of finger	97
5.5	Specification of PA10-7C arm (1/2)	100
5.6	Specification of PA10-7C arm (2/2)	101
5.7	Specification of PA10-7C servo driver	102
5.8	Noise of the raw V_{x_c} output and the V_{x_c} output with noise-cut filters	106
5.9	Noise of the raw V_{y_c} output and the V_{y_c} output with noise-cut filters	106
5.10	Noise of the raw $V_{I_{all}}$ output and the $V_{I_{all}}$ output with noise-cut filters . . .	106

5.11	Specification of processor board DS1005	108
5.12	Specification of DA board DS2103/A	109
5.13	Specification of counter board DS3002/A	109
5.14	Specification of AD board DS2002/A	109
5.15	Specification of IO board DS4002	110
5.16	PID control gain of each joint of the hand	118
6.1	Parameters used for analysis of Jacobian coefficient	134
6.2	Parameters used for gain setting of control equations	143
6.3	Gain and reference value of control equations	143
6.4	Convergence time of distance and postures in independent and interference control method	161
6.5	Convergence time of distance and postures at each initial position	167
6.6	Main specification of the IC using for the analog circuit	175
6.7	Main specification of DC-DC converters	176
6.8	Gain of analog feedback circuit	177
6.9	Parameter of analog circuit	177
7.1	Parameter of linear equation a, b and reflectance · conversion factor αk	189
7.2	Estimated error of distance at $d = 2 \text{ mm}$	206
7.3	Maximum distance output and relative reflectance at each surface of target object (relative reflectance: compared with kodak gray card 90% white))	207
7.4	Parameter and gains of relative speed control using $1/\tau$	220
7.5	Fingertip velocity at the time of contact for each object.	224
8.1	Parameters of the arm tip velocity control (Eq. (8.11)~(8.16))	233
A.1	Internal wiring of ARCNET module board (DS4201)	267
A.2	Wiring of adapter cables (CH1)	267
A.3	Wiring of adapter cables (CH2)	267

第1章

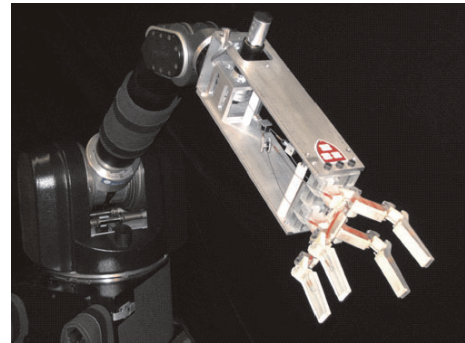
序論

1.1 背景

人は、机上に乱雑に置かれた本やコップなど、種類の異なる対象物を適切に把持できるほか、自身の指よりも小さなネジを摘み、器用に組み立て作業を行うことができる。こういった各種物体に応じた適切な把持と精密な操作を一種類のエンドエフェクタとアームにより実現することは今もなお難しい。多くの製造ラインではすでに、平行グリッパを備えたロボットアームが導入されているが、把持の成功率を高めるために、パーツフィーダを用いて正確に部品供給することや、ロボットと作業台との間の位置関係を精密に調整する必要がある。これらが生産ラインの仕様変更や複数種類の物体への対応を困難にしている。このため、ロボットによる自動化は、ほとんどが単一種類の物体の単純作業のみに留まっており、複数種類の物体のピッキング作業と組み立て作業は、今も人の手に頼る割合が大きい。従って、産業分野やホームサービス分野では、より高度な物体把持・操作のための技術が必要とされている。

例えば、産業分野で自動化が求められている作業の一つに、物流倉庫内での商品のピッキングがある^[1]。これは図1.1に示す通り、ぬいぐるみや菓子箱、カップといった様々な種類の対象物を棚から取り出し、カゴの中に入れる作業である。この作業では、ロボットハンドは対象物の形状や柔らかさに応じて、掴み方や接触位置、接触力を調整する必要がある。

また、少子高齢化の進行を背景に、人の生活環境下で作業を行うホームサービスロボットにも期待が集まっている。人の生活環境では、時々刻々とロボットと人や物体との間の位置関係が変化するため、ロボットはこの環境の変化に適応して作業を行う必要がある。具体的な作業としては机上の食器

Fig. 1.1 Amazon picking challenge ^[1](a) Barrett Hand
(Barrett Technology)(b) Robotiq Adaptive Gripper
(ROBOTIQ)(c) SDM hand
(Yale University)Fig. 1.2 Under-actuated hands (gripper type and multi-finger type) ^[2, 3, 4]

や本などを適切に把持し片づけることや、ドアの開閉のように人間のために作られた道具を扱うことのほか、人との物体の受け渡し等のインタラクションがある。

さらに、産業分野やホームサービス以外に、遠隔操作型のロボットシステムにおいても器用な物体把持・操作の技術が必要とされている。例えば、被災地や宇宙空間のように、人間が立ち入ることができない環境下で活動するロボットには、周辺環境の探査のほか、障害物の撤去やバルブの開閉作業などがある。操作者の安全面を考慮すると、人が遠隔地でモニタを見ながら作業を遂行する方式が望ましいが、モニタ越しに作業することで、奥行

き感の欠如や死角が発生し，適切な位置にエンドエフェクタを移動させることが困難となる．

こういった，より高度な物体把持・操作技術の要求を背景に，機構やセンシング，制御など，様々な方面からロボットハンドの研究・開発が取り組まれている．

1.2 劣駆動・柔軟素材ハンド

機構面では，物体形状に倣って把持を行う“劣駆動ハンド” [2, 3, 4, 5, 6, 7] の研究が盛んである（図1.2）．劣駆動ハンドは，関節数に対して自由度（モーター数）が少ないハンドの総称であり，主に，リンク機構やクラッチ機構を用いる方式 [2, 3, 7] や，ワイヤにより複数の関節を連動させる方式 [4]，空気圧変化により弾性体を屈曲させる方式が提案されている [6]．劣駆動ハンドは，指数や関節数に対し，少ないアクチュエータで構成できることから，安価であり，耐故障性が高く，制御が単純でありながら多種類の物体を把持可能な利点を持つ．また，物体との接触に伴って瞬時に関節角度の調整が行われるため，応答が良いことも長所である．

しかしながら，リンク機構やクラッチ機構を用いる方式は，接触に伴って作動することから，指の開閉速度を速めると，物体に加える撃力が増加する問題がある．このため，柔軟物や壊れやすい物体を高速に把持することは難しい．これに対し，指のリンク部分や関節を弾性体で構成する方式では，把持した際の衝撃を吸収できることから，物体に加える撃力を小さくできる利点を持つ．ただし，物体重量や，物体面と指先との間の位置誤差に応じて，適切な関節のバネ定数は変化することから，機構による一定のバネ定数では把持可能な物体重量と修正可能な位置誤差には限界がある [9]．

またこの他，指を使用せずに物体を包み込んで把持する“Jamming gripper”が提案されている．Jamming gripperは半球型の薄いエラストマー内部に粉末が充填されており，この内部の空気圧を減圧する真空ポンプとで構成される．エラストマー内部の空気圧が正の時は，粉末が自由に移動するため，表

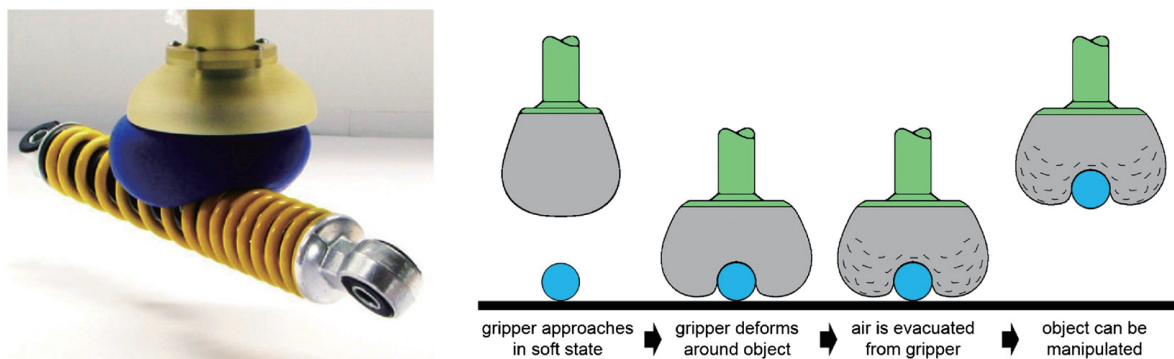


Fig. 1.3 Grasping procedure of the jamming gripper

面は柔軟であるが，内部を負圧にすることでジャミング現象¹が生じ，表面が硬化する．図1.3にJamming gripperの把持手順を示す．まず，半球内部の空気圧を正にすることで表面を柔軟にし，この状態でグリッパを対象物に押し付けてその形状に馴染ませる．次に，半球内部の空気を抜くことで表面を硬化させ，物体を把持する．Jamming gripperは非常に単純な構成であり，また，押し付けるだけで多種形状の物体把持が可能となるため注目を集めていたが，2016年に耐久性の問題を理由に産業用途での実用化が断念されている^[10]．

以上より，十分な耐久性を持ち，かつ柔軟物や壊れやすい物体を含む対象物を高速に把持可能なハンドを実現するためには，機構の工夫のみでは不十分であると考えられる．そこで，把持目標物体の位置・姿勢，形状，重量，摩擦係数をロボット自身あるいは環境内に搭載されたセンサによって計測し，これらのパラメータに応じた把持制御を行う必要がある．

¹臨界密度を超えた粉体にせん断応力が発生して固体のように振舞う現象^[8]

1.3 視覚・触覚センシング

センシングに基づく把持研究では，視覚センサや触覚センサが用いられる場合が多い^[11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]．たとえば，2002年に東京大学の並木らは，高速ビジョンを用いて対象物へのアプローチから把持までの一連の動作や把持物体の持ち替え，視覚・触覚を用いた高速かつロバストな紐結び動作などを実現しており^[11, 12, 13]，1998～2006年に，九州大学の長谷川らは，ステレオカメラと指先接触センサを統合した対象物の位置・姿勢の計測^[14]や，柔軟被覆をもつ指先を使用したエッジ検出手法を提案した^[15]．また，2010年に東京大学の伊藤らは，ヒューマノイドに搭載したカラー距離センサ情報により対象物を円柱形状に近似し，未知物体に対しても適切なアプローチ経路や把持力の選択する手法を提案している^[16, 17]．

しかしながら，現状のハンドは物体近傍から把持までに時間を要するものが多く，また，対象物の取りこぼし等の把持失敗が頻繁に生じる．この一因として，視覚・触覚センシングの欠点が挙げられる．

まず，視覚センサの欠点として，ハンドを把持目標物体に近づけるにつれて，物体が隠蔽される点がある．この際，目標物体に関する情報量が減少するため，位置や姿勢の推定精度が低下する．特に，目標物体が移動する場合，ハンドを物体に追従させることは非常に難しい．一方，隠蔽や推定誤差により生じる物体近傍での位置誤差を，触覚センサによる手探り動作によって修正する試みもあるが^[18]，手探りでは高速性に難があり，また，触覚センサは一定以上の圧力が作用しないと接触を検知できないため，対象物の変形しやすい場合や壊れやすい場合には適用しがたい．

以上より，ハンドと物体とが近い位置関係にある時は，視覚から見て対象物の大部分が計測できず，また，対象物に触れるまでは，触覚センサは機能しないことから，対象物に関する位置・姿勢情報が著しく欠落する．従って，物体近傍では，接触するまでハンド指先を低速度で動作させる必要性が生じ，把持動作が低速となる．

1.4 近接覚センシング

そこで，図1.4に示すように，視覚と触覚の情報を補完するものとして，ハンド表面から数十ミリメートルの範囲にある物体を検出する近接覚センサが注目されてきている [28, 29, 33, 30, 31, 34]．近接覚センサはハンド表面から直接，物体との位置関係を検出することから，非接触で視覚の推定誤差を補正し，適切な把持位置・姿勢への調整を可能とする．非接触下で制御を行うため，ハンドや対象物を壊す恐れがなく，かつ，物体近傍での把持動作を高速にできる長所があることから，本論文では近接覚センサをロボットハンドに導入する．

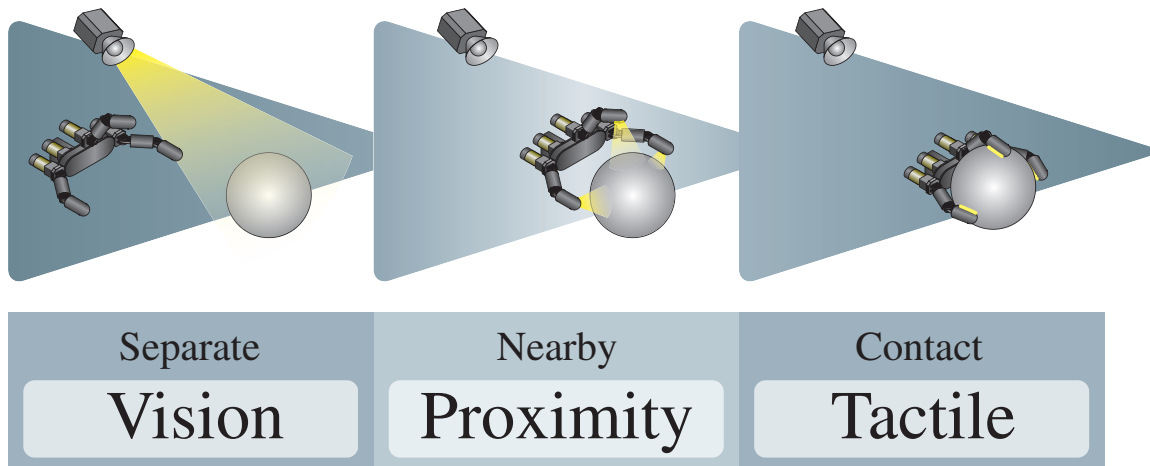


Fig. 1.4 Grasping strategy based on a vision, a proximity and a tactile sensor

1.4.1 関連研究

ロボットハンドへの近接覚センサの導入は、古くは1973年にNASAのジェット推進研究所(JPL: Jet Propulsion Laboratory)のLewisらによって提案された^[19]. さらに、同研究所のBejczyは、平行グリッパとアームを備えた遠隔操作ロボットに近接覚センサを導入し(図1.5), 操作実験を行った結果を1980年にまとめた. これらの古い文献^[19, 20, 21, 22]では、1検出素子の正面に存在する物体との距離計測が主であったが、近年は、検出素子の小型化や周辺回路の集積化に伴い、ハンド指先や掌、アーム部などに複数の素子を配置可能となり、物体の位置や傾きも検出できるようになった.

例えば、2011年に、ミュンヘン大学のMittendorferら^[23]は、ヒューマノイドロボットの全身に実装可能な触・近接覚モジュールを提案している(図1.6). 複数の検出素子を配置する場合、配線接続の複雑化や応答速度の低下などの問題があるが、文献^[23]では、隣接するモジュール間の通信によりネットワークを構築し、分散して配置したコントローラ(TSU:Tactile Section Unit)でセンサ出力を一次処理することで、これらの問題を解決している.

また、検出原理についても現在までに様々な手法が提案されており、代表的なものとしては、赤外光、静電容量、超音波、渦電流などを利用する方式がある. 2016年時点で、入手可能な製品や研究中の近接覚センサのうち、検出距離や応答時間が明記されているものを図1.1に示す. なお、レーザー変位計は近接覚センサとは呼ばれないが、計測レンジが比較的短いものが

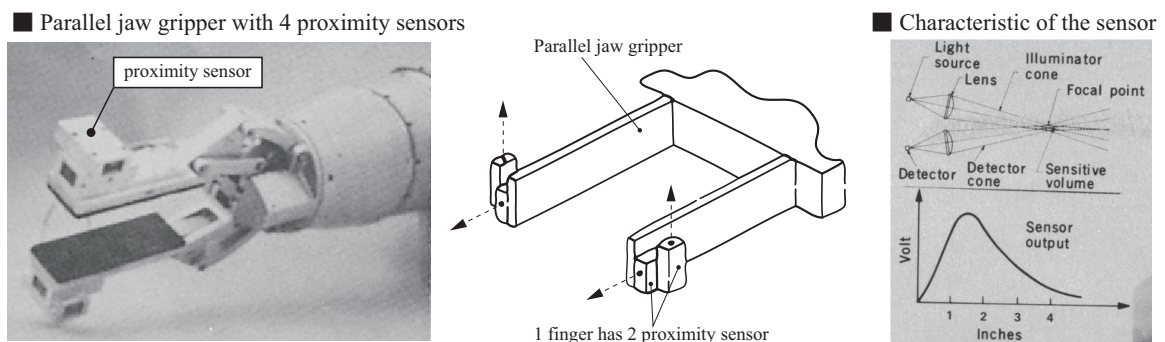


Fig. 1.5 Proximity sensors for remote operating robot system^[21, 22]

■ Multimodal Tactile-Sensing Modules

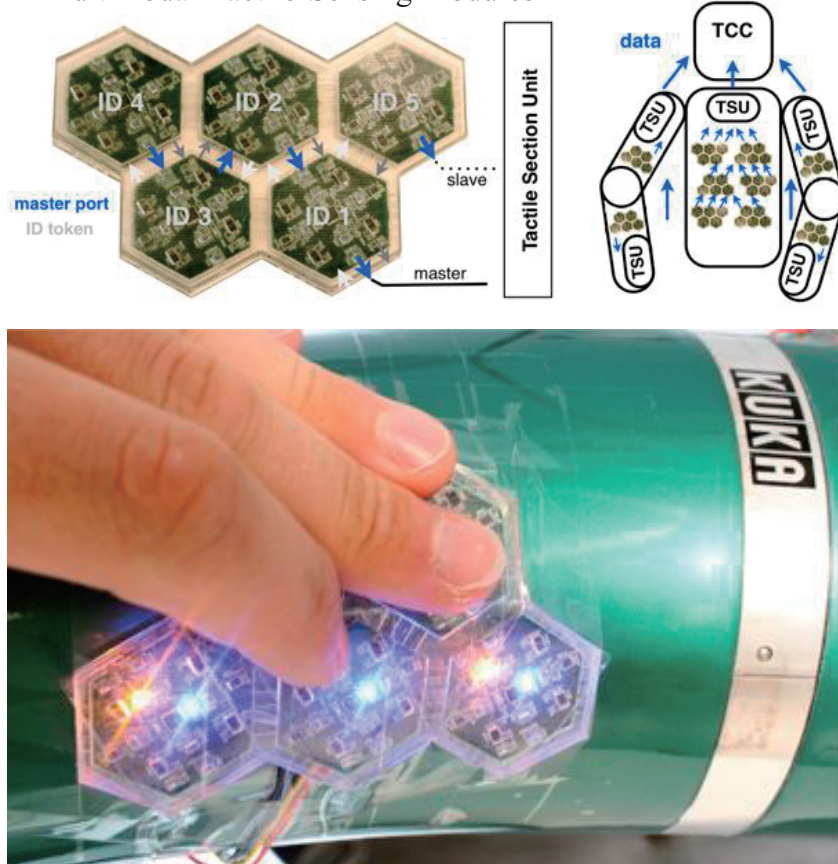


Fig. 1.6 Tactile/proximity sensor modules (The modules can be mounted on a whole body of a humanoid robot)^[23]

あるため、同図に含めている．また、産業現場で一般的に用いられる近接スイッチは、物体が一定距離内にあるか判定するためのON/OFF情報しか得られないため除外した．同図の通り、光学式は細分すると、レーザ三角測量方式(Laser Triangulation)、反射光強度方式(Optical Reflection Intensity)、光電三角測量方式(Photo-Electric Triangulation)、タイムオブフライト方式(Optical Time of Flight)などがある．この中で、反射光強度方式は、物体面からの反射光の強さにより距離を計測するため、物体表面の光の反射特性の影響を受ける欠点がある．これに対し、他の3つの方式はセンサ面に対する反射光の入射角度や、入射するまでの時間を利用するため、物体面の光学的特性の影響が少ないという長所がある．一方で、距離への換算やノイズ削減

Table 1.1 Response time and detection range of proximity sensors (available or under study as of 2016 ¹⁾)

Type	Company or resercher	Model or Name	Size [mm]	Responce time [ms]	Range [mm]	Range [mm]
Laser Triangulation						
	KEYENCE	IL-030	48.5 × 37.9 × 22.6	0.33 (Min.)	20 ~ 45	
Optical Reflection Intensity						
	ROHM	RPR-220	1.9 × 3.2 × 1.1	0.01	5 ~ 12	
	OMRON	EE-SY1200	4.9 × 6.4 × 6.5	0.03	1 ~ 4	
	K. Hsiao [21] (2009)	Optical proximity sensor (TCND5000×4)	10×20×10 (each element: 6 x 3.7 x 3.7)	-	2 ~ 40	
Optical Time of Flight						
	STMicroelectronics	VL6180X	4.8 × 2.8 × 1.0	7.5 ~	~ 100	
	STMicroelectronics	VL53L0X	4.4 × 2.4 × 1	~ 20 (Min.)	~ 2000	
Photo-Electric Triangulation						
	SHARP	GP2Y0E03	16.7 × 11.5 × 5.2	~ 40.0	40 ~ 500	
Capacitive						
	B. Mayton [22] (2009)	Electric Field Pretouch sensor	- × - × -	-	~ about 100 to 150	
	S. E. Navarro [25] (2014)	Tactile proximity sensor	40 × 40 × -	~ 100.0 (48 elements)	0 ~ 100	
	CMC Technology Development Co., Ltd.	SC3	- × - × -	1.0	0 ~ 500	
Eddy current						
	KEYENCE	EX-422V	φ22×35×35	0.075 (Min.)	0 ~ 10	
Ultrasonic wave Time of Flight						
	SainSmart	HC-SR04	45 × 20 × 15	0.1 ~ 23.2	20 ~ 4000	

処理に数十ミリ秒の時間を要するため，応答時間に関しては反射光強度方式の方が優れる．ただし，いずれの方式も反射光を利用するため，黒色や透明物体のように，反射光が著しく減少する物体の検出は難しい．さらに，鏡面反射特性が強い物体では，物体面に対する検出素子の傾きに依存して反射光が大きく増減するため，検出が困難である．

またこのほか，光学式は環境光の強さにより，その感度や検出距離が変化する欠点があるが，静電容量式 (Capacitive) は外乱光の影響を受けない利点を持つ．また，静電容量式では，対象物の材質や体積によってもセンサ出力

¹表の書式は1994年，Volpeら^[40]の近接覚センサの評価・調査論文を参考にした

Table 1.2 Undetectable objects and disadvantages of each proximity sensor type

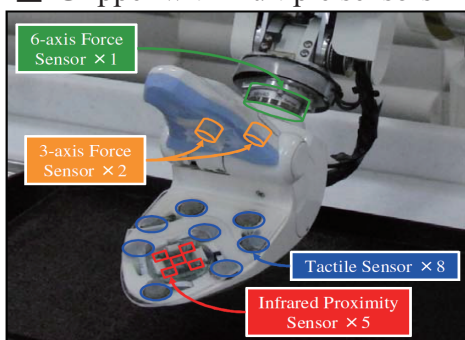
	Optical	Capacitive	Eddy current	Ultrasonic wave Time of Flight
Undetectable objects	<ul style="list-style-type: none"> • black color • transparent • specular reflection surface 	-	<ul style="list-style-type: none"> • non-metal 	<ul style="list-style-type: none"> • sponge • cloth, etc... (objects that containing a lot of air inside)
Disadvantage	<ul style="list-style-type: none"> • light condition affect the output signal 	<ul style="list-style-type: none"> • sensor size is large • Many parameters (material, volume, etc...) affect the output signal 	<ul style="list-style-type: none"> • detectable objects is few 	<ul style="list-style-type: none"> • sampling cycle is low rate

が変化するため、光学式よりも多くの物体特徴量を検出できる可能性がある。ただし、センサ出力に影響を与えるパラメータが多いことから、センサ出力は強い非線形特性を持つ。特に、検出物体と地面の間での接地状態にも依存してセンサ出力は変化するため、物体に依存せず距離・姿勢を計測することは非常に難しい。さらに、出力信号のS/N比を高く保つには、1センサ当たりの電極面積を広くする必要があり、小型化や高密度な検出素子配置が困難である。

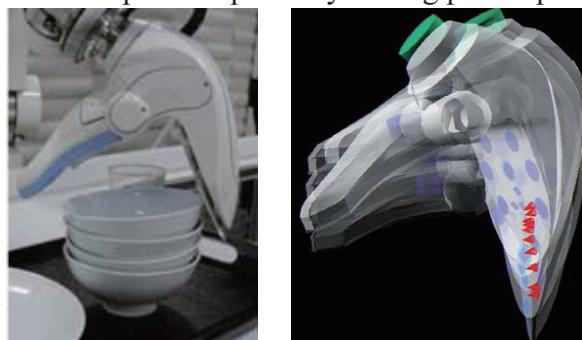
静電容量式が対象物の影響を強く受けやすい一方で、超音波を使ったタイムオブフライト方式(Ultrasonic wave Time of Flight)は、材質や表面の光の反射特性によらず、ロバストな距離計測が可能であり、この点が光学式や静電容量式に比べて優れている。しかしながら、対象物表面に空気が多く含まれている場合、反射音波の強度が著しく減少するため、スポンジや布等の検出は難しい。一方、渦電流方式は、検出可能な物体が金属のみという欠点があるものの、応答時間が短く、汚れやほこりの影響を受けづらいという利点を持つため、産業分野では広く用いられている。

図1.2に各方式で検出が困難な物体や欠点を示す。これまで述べた通り、近接覚センサはいずれの方式も検出が困難な物体や欠点があるため、アプリケーションに応じて適切な方式の選定が必要である。本論文では、多指ハンド指先の狭い実装スペースにセンサを配置することと、応答速度の早さ、検出可能な物体種類の多さを特に重視し、反射光強度方式を用いることとした。他研究においても同様に、センサのサイズや応答時間、検出できる対象物の種類を考慮し、反射光強度方式か静電容量式が用いられることが多い。

■ Gripper with multiple sensors



■ Oriented points acquired by tracing piled-up bowls



■ Picking up piled-up rice bowls

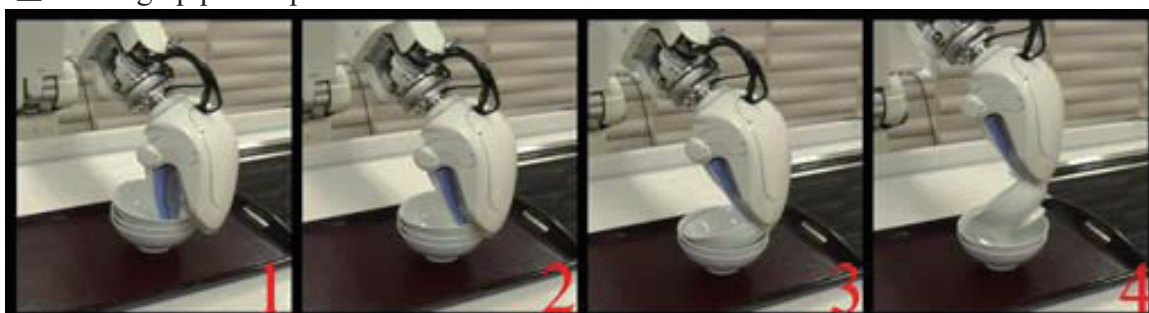


Fig. 1.7 Detection of an object features and grasping of dishes by active grouping using optical proximity sensors (photoreflectors) ^[29]

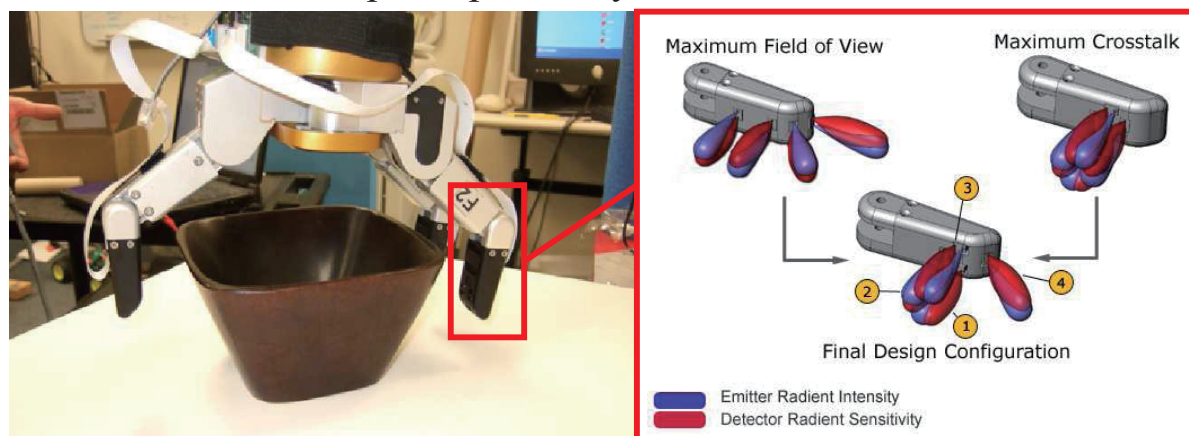
2009年に東京大学の藤本ら^[29]は、光学式センサを搭載したグリッパにより、対象物のなぞり動作を行うことで、エッジ情報などの特徴量を抽出する手法を提案している（図1.7）。これにより、重なり合った食器を一枚ずつピックアップする動作を実現した。

2009年にマサチューセッツ工科大学のHisiaoら^[30]は、バレットハンドの3指に4素子ずつフォトリフレクタを配置し、確率モデルを用いたセンサ出力補正と反射的な把持制御器を用いることで、様々な日用品の把持を実現している（図1.8）。

また、2010年に、インテル研究所のMaytonら^[31]は、静電容量式の距離センサをバレットハンドの3指に搭載することで、人間とロボットの間での物体の受け渡し動作や、机面上の物体に対する自動的な把持位置調整を実現している。

この他、特殊な検出原理の近接覚センサを用いている例としては、Jiang

■ Barret hand with optical proximity sensors



■ Snapshots of the robot picking up different objects.

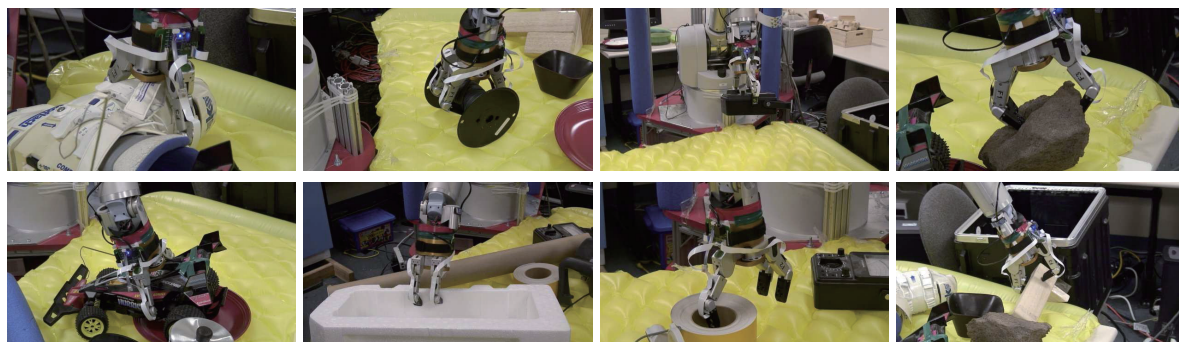


Fig. 1.8 Reactive grasping of common objects using optical proximity sensors (photoreflectors) and a reactive controller [30]

らの研究^[33]がある．2012年にJiangらは，PR2ロボットの平行グリッパの先端，および把持面に小型のマイクを配置し，物体との接近に伴う環境雑音のスペクトル変化から，距離を検出する手法(Seashall effect pretouch sensor)を提案した．環境雑音を利用するため，蛍光灯などの外乱光の影響を受けないという利点があるほか，一般的に光学式センサや視覚センサでは検出が難しい透明物体の検出が可能という特徴を持つ．

さらに，2014年にカールスルーエ工科大学のNavarroら^[34]は，静電容量式の触・近接覚センサを平行グリッパに搭載することで，対象物の位置・姿勢に対し，手先の並進・回転の6自由度の同時制御を実現している（図1.11）．また，力覚インターフェースにセンサ出力をフィードバックすることにより，

遠隔操作における人の操作支援のためのシステムも提案している。

2015年には，清華大学のGuoら^[36]が，発光部と受光部を分離した光学式センサをPR2ロボットの平行グリッパに搭載することで，音響式のセンサでは検出が困難な柔軟物体と，光学式センサが不得意とする鏡面反射特性を持つ物体の検出を実現している．文献^[36]の手法は非常にシンプルで，平行グリッパの一方の指に発光部を，他方の指に受光部を搭載し，指と指の間に対象物が入った際の光の遮断を利用して物体を検出する．同様の検出手法は1994年にニューヨーク大学のTeichmannら^[25]によっても提案されている．

上記文献に加え，その他の関連研究における1)近接覚センサの検出原理と2)ハンドの種類・自由度を表1.3に示す．ハンドは開閉1自由度の平行グリッパや，4自由度のバレットハンド等が一般的に用いられており，関節の自由度が低いものが主である．このため，近接覚の出力に基づく制御は，指の開閉動作のための屈曲1自由度とアーム手先4自由度のみに留まっている．下条研究室の溝口ら^[42]，長谷川ら^[47]，鈴木ら^[44]は3指8自由度を持つ多指多自由度ハンドを用いた研究を行ったが，アーム先端の姿勢制御のみや指の開閉動作等の低自由度の制御に留まっている．

将来的に，ハンドの指による操りや道具の操作を行うためには，ハンド関節の自由度は高い方が望ましいが，近接覚に基づき，多指多関節ハンドとアームを制御する試みは行われておらず，一般的な制御アーキテクチャも存在しないのが現状である．

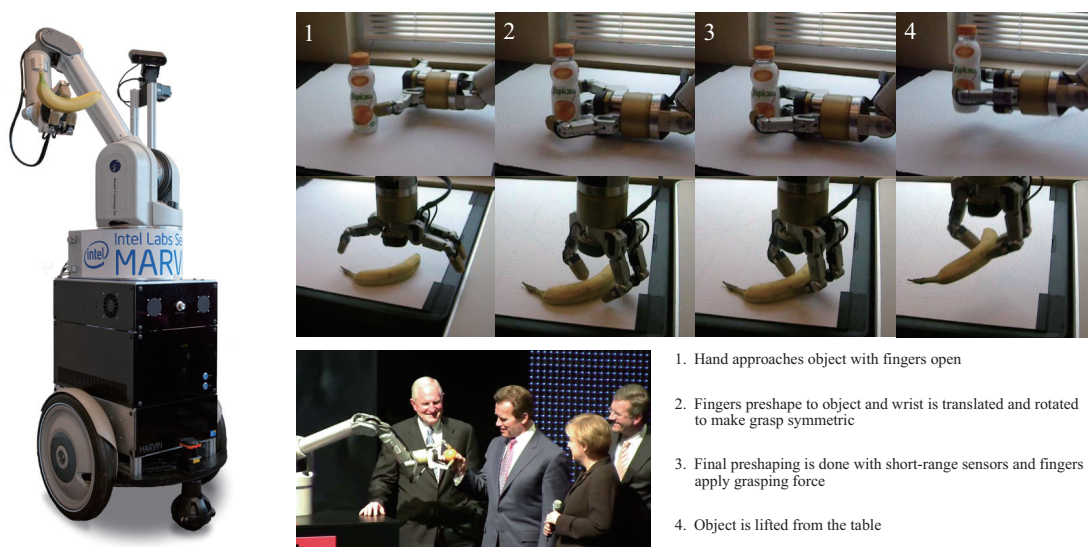


Fig. 1.9 (Upper) Adjustment of grasping position to an object placed on a desk surface, (Lower) An object transfer operation between the robot and a human using electric-field sensors (capacitive type) [31]

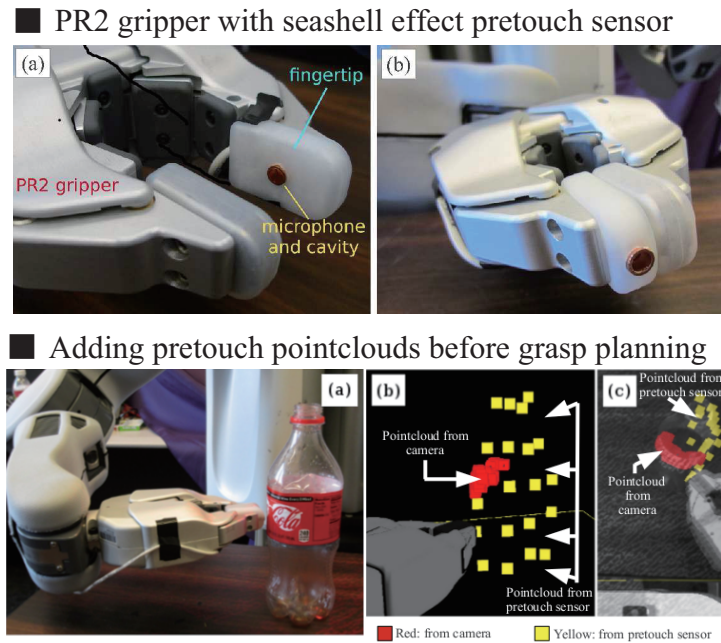


Fig. 1.10 Transparent object detection using sea-shell effect pretouch sensor [33]

■ Overview of tactile / proximity sensor & schematic structure



■ Overview of a robot

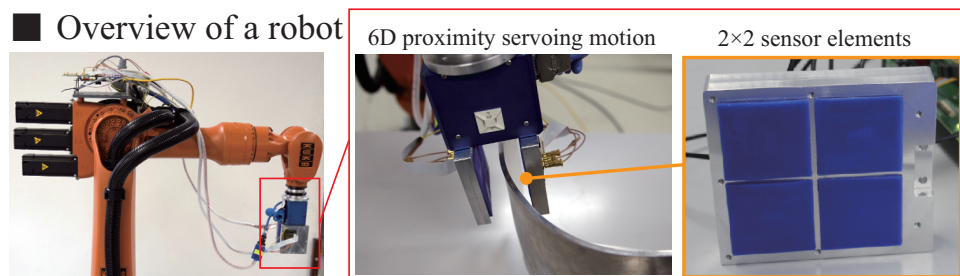


Fig. 1.11 6D proximity servoing using tactile/proximity sensor (capacitive type) [34]

Table 1.3 Proximity sensor based approaches for grasping unknown objects

	Detection method	Sensor output	Hand type (D.O.F)
Lewis and Bejczy ^[19] (1973)	Reflected light	Distance	Parallel jaw gripper (1)
Johnston ^[20] (1977) Bejczy ^[21, 22] (1977, 1980)	Reflected light	Distance	Parallel jaw gripper (1)
Cheung and Lumelsky ^[24] (1992)	Reflected light	Distance	-
Teichmann and Mishra ^[25, 26] (1994, 2000)	Transmitted light	ON/OFF (Object detection)	Parallel jaw gripper (1)
Seguna and Saliba ^[27] (2001)	Reflected light	Distance	Underactuated three-finger hand (3)
Walker et al. ^[28] (2007)	Reflected light	Distance, posture	-
Mizoguchi et al. ^[42] ※1 (2008)	Reflected light	Distance	Multi-D.O.F three-finger hand (8)
Fujimoto and Mizuuchi ^[29] (2009)	Reflected light	Distance	Gripper (1)
Hsiao et al. ^[30] (2009)	Reflected light	Distance, postures	Barret hand (4)
Lee et al. ^[32] (2009)	Electric field	Distance, positions	-
Hasegawa et al. ^[47] ※1 (2010)	Reflected light	Distance, postures	Multi-D.O.F three-finger hand (8)
Mayton et al. ^[31] (2010)	Electric field	Distance	Barret hand (4)
Suzuki et al. ^[44] ※1 (2012)	Reflected light	Distance, postures	Multi-D.O.F three-finger hand (8)
Jiang and Smith ^[33] (2012)	Seashell effect	Distance	Parallel jaw gripper (1)
Navarro et al. ^[34, 35] (2014, 2015)	Electric field	Distance, postures	Parallel jaw gripper (1)
Guo et al. ^[36] (2015)	Transmitted light	ON/OFF (Object detection)	Parallel jaw gripper (1)
Konstantinova et al. ^[37, 38] (2015, 2016)	Reflected light	Distance	-
Shimonomura et al. ^[39] (2016)	Reflected light & stereo camera	Distance, positions, postures, outline, etc	Parallel jaw gripper (1)

※1 Shimojo lab, The University of Electro-Communications (UEC).

1.5 研究目的

本論文では近接覚を用いた多指多関節ハンドとアームの統合制御方式を提案し、高速な把持位置・姿勢補正の動作を実現する。この方式はセンサ出力により、直接ハンドの関節とアーム手先位置・姿勢を制御することから、反射型制御²(reactive grasping, reactive control, reactive algorithm)の一種であり、応答速度が早く、物体ごとにソフトウェアの変更が不要であるという特徴を持つ。本方式を産業分野やホームサービス分野のロボットに導入することで、視覚センサでおおよそその物体位置・姿勢を検出し、ハンドを接近させるのみで、位置・姿勢誤差に対しロバストな把持が可能となる。また、ハンドが自律的に把持位置・姿勢を調整することにより、遠隔操作型ロボットでの操作者の操縦負担の軽減が期待できる。

1.6 論文構成

本論文は図1.12に示す全9章で構成され、ハンドとアームの統合制御方式の実現に向けて図1.13に示す流れで研究を行った。各章の概要は以下の通りである。

第2章では、ロボットアーキテクチャの変遷を紹介し、反射型制御の種類とその特徴を整理することで、本研究で提案する方式の新規性と有用性を明確にする。

第3章では、指先姿勢・距離の同時制御に適したセンサ出力特性とするための素子配置設計を行う。

第4章では、開発した指先部近接覚センサの姿勢・距離検出特性を実験により検証する。

第5章では、ハンドとアームの統合制御方式に適したシステムを構築する。

第6章では、物体形状に倣ってハンド指先の配置を調整するための制御方式を提案し、実験によりその応答特性を検証する。

²反射型制御の詳細については2章で述べる

第7章では，物体表面の反射率が未知の対象物に対する1)絶対位置制御と2)相対速度制御を提案し，実験によりその有効性を検証する．

第8章では，ハンド各指の制御に加えてアーム手先位置・姿勢の制御を導入することで，ハンド・アームの統合制御方式による把持位置・姿勢調整を実現する．

第9章では，本研究の成果，結論をまとめ，今後の課題，展望について述べる．

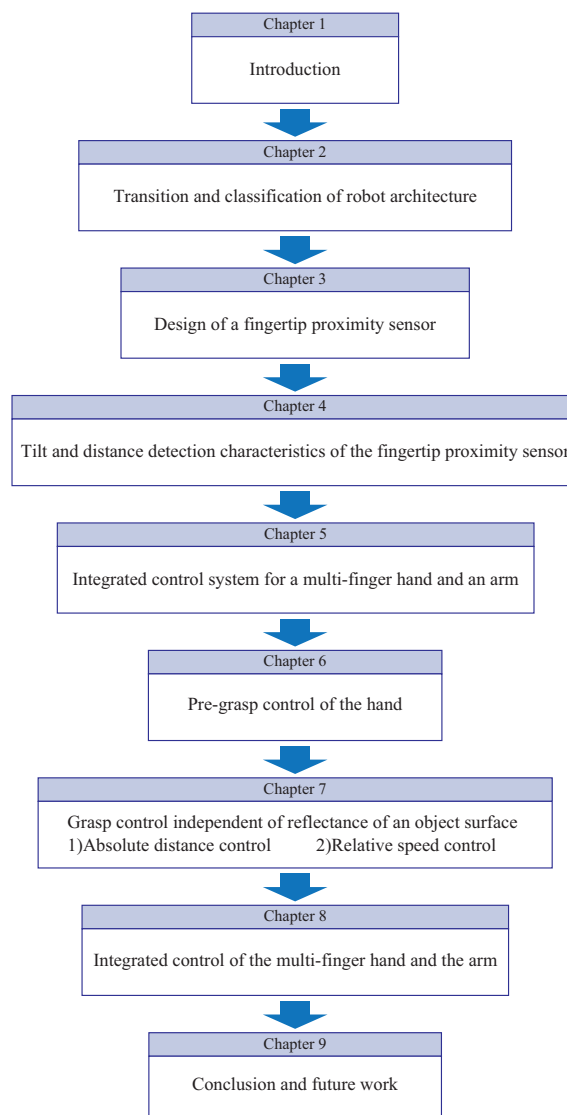


Fig. 1.12 Composition of this thesis

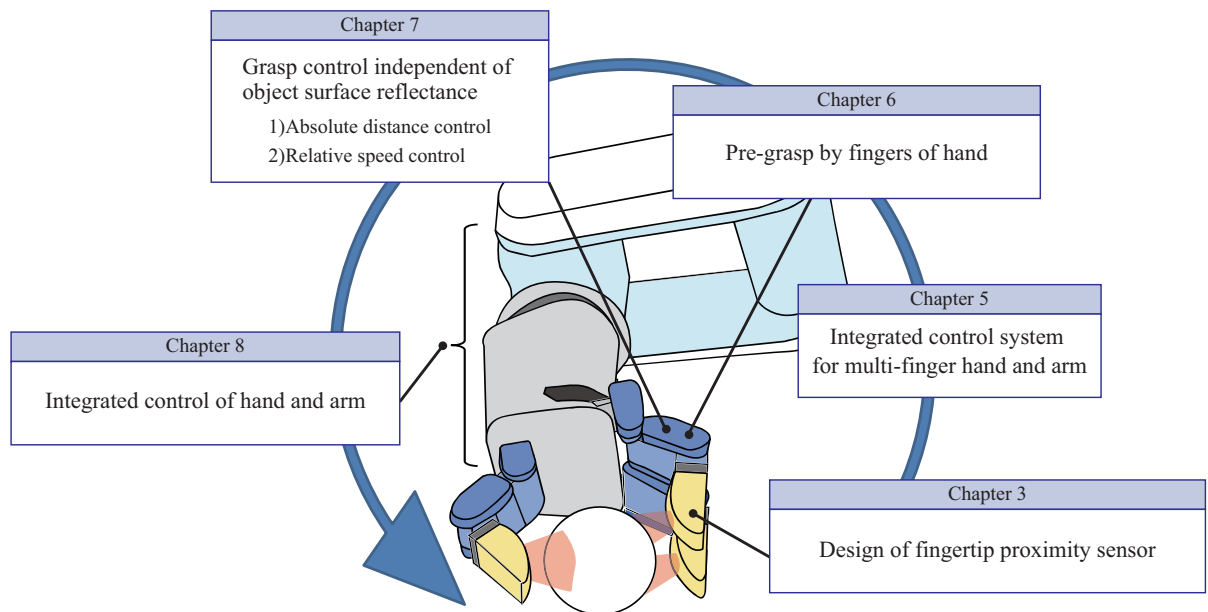


Fig. 1.13 Flow of this research

第2章

ロボットアーキテクチャの変遷と分類

センシングに基づく反射型制御の先行研究としては、文献[30, 52, 53, 25, 54, 55, 56]があるが、それぞれの手法には明確な区分はなく、全てreactive grasping, reactive control, reactive algorithmと呼ばれている。そこで、本章では、これまでに提案されたロボットアーキテクチャを整理し、反射型制御の位置づけを定義する。この上で、反射型制御に属する手法の分類を行い、本論文で用いる手法の特徴を明確にする。

ここで、ロボットアーキテクチャはセンサ情報処理や動作計画、サーボ制御等を含む制御システム全体の構造を指す。まず文献[57]を参考に、これまでに提案されてきたロボットアーキテクチャを、モデル規範型 (Model-based)¹と行動規範型 (Behavior-based)、およびハイブリッド型 (Hybrid) に分類する。モデル規範型はセンサ出力から物体や環境のモデルを構築し、これらのモデルを基に動作を計画するが、行動規範型ではセンサ出力から直接、動作を決定する。また、ハイブリッド型は、モデル規範型と行動規範型を組み合わせたものである。

本論文では、行動規範型に属するものをサブサンプションアーキテクチャ、生物模倣型、および反射型制御とに分け、反射型制御をセンサダイレクト制御型、状態遷移型とに分類する。以上の分類を図2.1に示す。なお、サブサンプションアーキテクチャは反射型制御と呼ばれることもあるが、他の方式と内部の構造が大きく異なるため、本論文では分けて議論を行う。

本論文は、指先に取り付けた近接覚センサの出力の偏りが“0”となるよう直接、ハンドの関節角度やアーム手先位置・姿勢を制御するため、センサダイレクト制御型に位置づけられる。また、我々が調査した範囲では、反射型制御に位置づけられる研究の中で、近接覚を用いて多指多関節ハンドと

¹文献[57]では塾考型アーキテクチャと呼んでいる

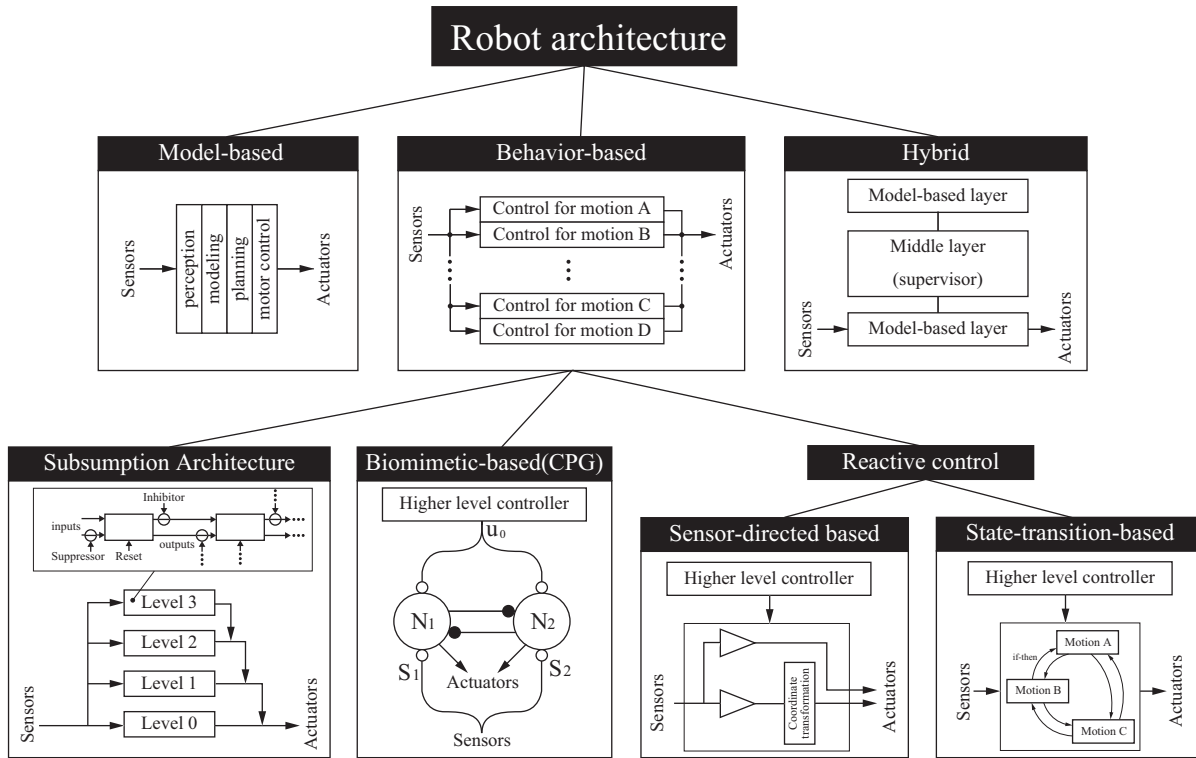


Fig. 2.1 Classification of robot architecture

アームを高速に制御する研究は行われておらず，本研究が初の試みである．

2.1 初期のロボットアーキテクチャ

ロボットアーキテクチャの最初のもは，1953年に生理学者のWalterが移動ロボットtortoiseの設計で用いたものとされている^[57]．tortoiseのセンサは，光源探索用のフォトセルと衝突検出スイッチであり，駆動系は操舵と前進用の2台のモータを持ち，内部回路は真空管と電磁リレー等で構成されていた．このロボットは光源への追従動作や，障害物回避のほか，充電ドッグへの移動が可能であった．これらの動作は，バッテリー残量に依存するセンサ感度の変化により，自然と優先順位がつけられており，簡単でありながら非常に巧妙な設計がなされていた．tortoiseはモータの回転数が低速度であったため，その動作は緩慢であったものの，絶えず環境中を動作し続け，バッテリー残量や環境光の影響を受けて，単純な仕組みからは想像できないほど

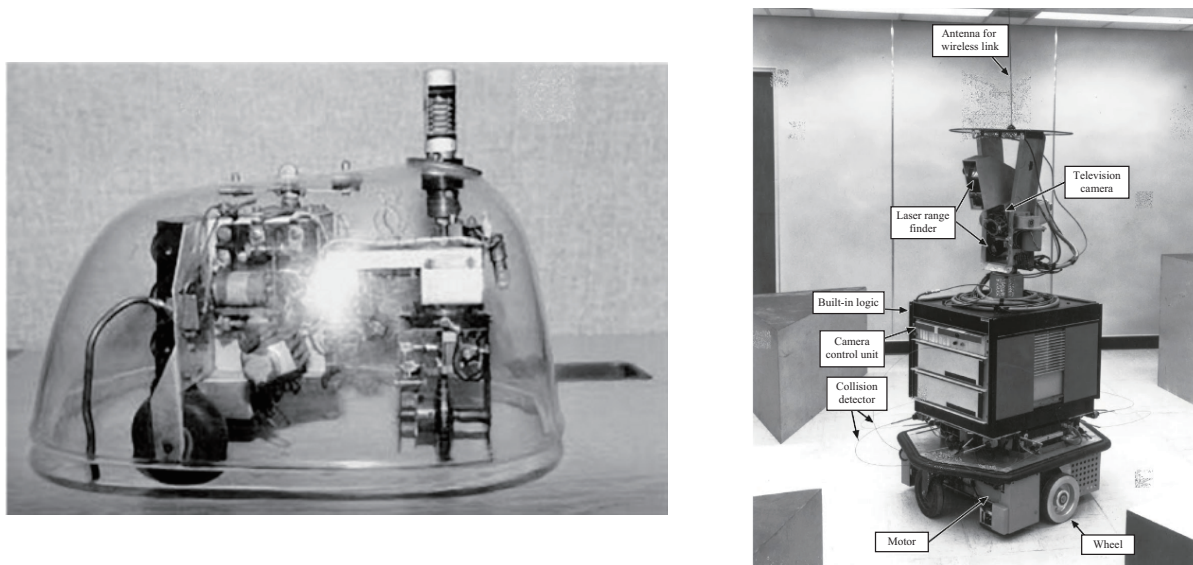


Fig. 2.2 (Left) tortoise (behavior-based architecture), (Right) Shakey (model-based architecture) [57]

複雑な振る舞いを見せた[58]. tortoiseのセンサは真空管を介して直接、アクチュエータと組み合わされていたため、このロボットのアーキテクチャは行動規範型のセンサダイレクト制御型に位置づけられる. しかしながら、この時代にはまだ明示的な制御システム設計の概念は示されていないかった.

一方、1969年にスタンフォード研究所で開発された移動ロボットShakeyは、tortoiseとは全く異なるアーキテクチャを用いていた. Shakeyは視覚システムと衝突検出器を備えた2輪の移動台車で、内部にカメラ制御ユニット等を搭載しており、tortoiseと比べるとはるかに高性能であった. また、センサ出力は直接、モータ駆動系に接続されるのではなく、STRIPSと呼ばれる人工知能システムのプランニングモジュールへと接続されていた. このモジュールにより、ロボットの視覚システムに映る映像から、周辺の環境のマップを構築することができ、また、ユーザが入力した目標位置までのナビゲーションを実行できた. 以上より、Shakeyのアーキテクチャは図2.1(Model-based)に示すように、視覚システムによる知覚(Perception)と、環境モデルの構築(Modeling)、プランニングモジュールによる行動計画(Planning)、モータ制御(Motor control)により構成されており、モデル規範型アーキテクチャの先駆けとなった.

2.2 モデル規範型アーキテクチャ

モデル規範型では，センサ情報を基に，タスクに関連する対象物や環境モデルを構築する．これらのモデルをもとに動作計画を立てる点がモデル規範型の第一の特徴である．第二の特徴として，認知－モデリング－行動計画－モータ制御の階層構造を持ち，複雑な問題を各モジュールごとの部分問題に分解することで単純化している点が挙げられる．

モデル規範型アーキテクチャの中で，際立った階層構造を持ち，かつ有名なものとしては，アメリカの規格標準局のJames Albusが開発したNASREMアーキテクチャがある^[57]．図2.3に示すように，このアーキテクチャでは6段階に階層が分かれており，上位ほど長期的な戦略となり，下位はサーボ制御等の短期的な制御の役割を担っている．最下層から入力されたセンサ出力は各階層における環境モデルの更新に用いられ，やはりモデルを基に動作

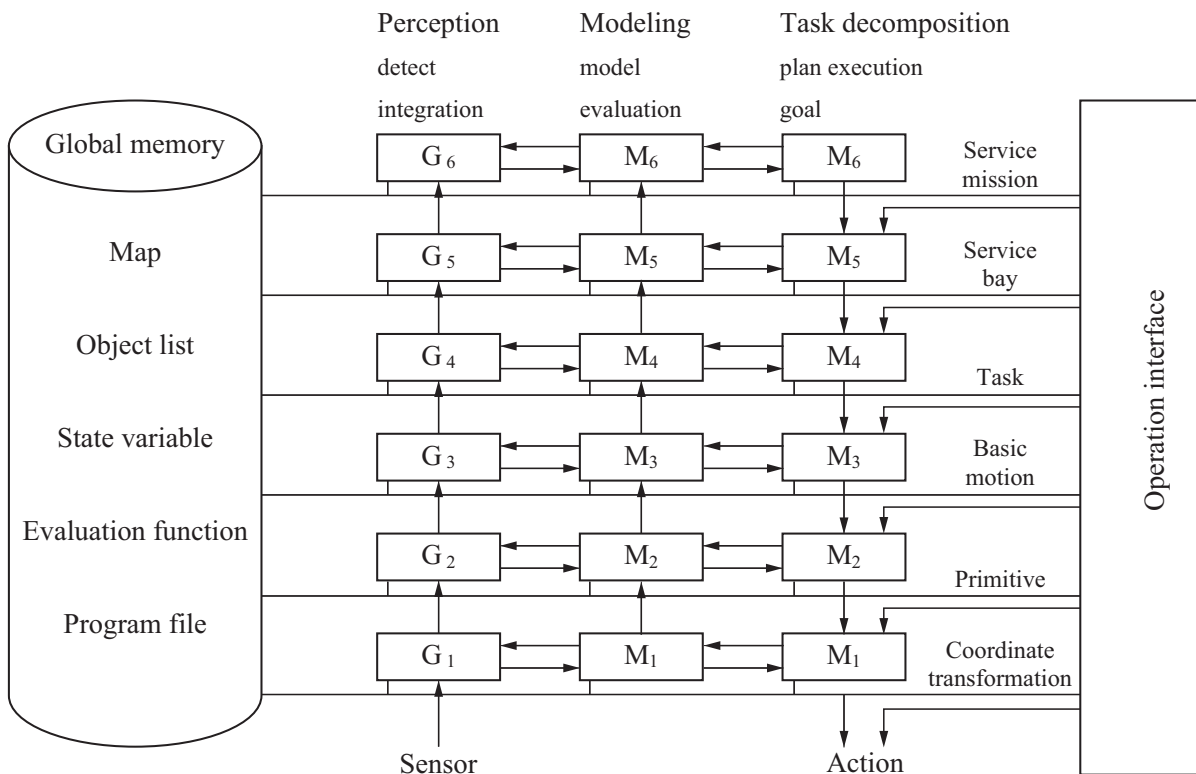


Fig. 2.3 NASREM architecture (Model-based) ^[57]

の計画がなされる。

モデル規範型は，行動計画のモジュールで多くの計算時間を要するため，このアーキテクチャを用いた初期のロボットは，動作のプランニング中は周辺環境が変化しないという仮定があった．Shakeyもプランニングモジュールの計算処理が実行される度に何度も立ち止まり，数メートル先の目標位置にブロックを運搬する作業に，6～8時間もの時間を要した^[58]．この計算時間の問題は，コンピュータの処理能力が向上するにつれて，緩和されつつあるが，現在でもモデル規範型は比較的長い計算時間を要するため，解決すべき課題の一つである．

2.2.1 モデル規範型アーキテクチャに基づく把持制御

移動ロボットと同様に，ハンドにおいても，モデル構築と行動計画が重視され，モデル規範型が積極的に用いられた．把持におけるモデル規範型の概要を図2.4に示す．まず，モデリングで物体の形状や位置・姿勢，摩擦係数，重心位置を設定し，物体と指先との接触モデルのほか，ロボットの運動学モデルを定義する．次に，与えられた物体の幾何学情報を基に，指先力と外力との釣り合いのとれた把持，すなわちフォースクロージャを形成するための指先力を計画し，この評価を行う．そして最後に，計画した指先力を実現するための関節トルクや角度を計算し，各関節のサーボ制御を実行する．

モデル規範型を用いた把持研究により，物体を安定して掴むための運動計画や把持の評価指標などが明確にされた．これらの研究では，把持行列を用いた指先力の決定や把持の安定性評価がよく用いられる．この把持行

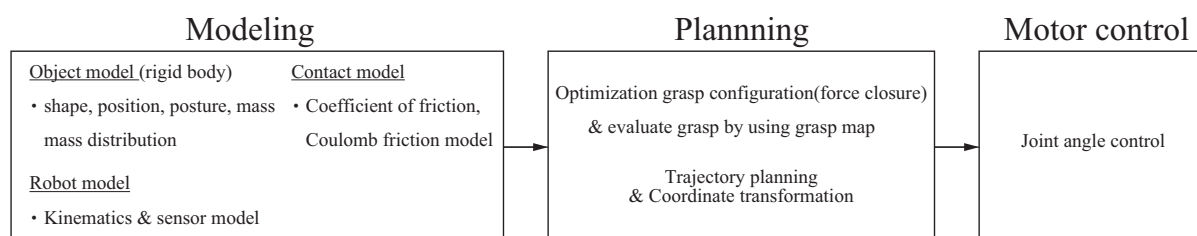


Fig. 2.4 Overview of model-based architecture in grasping

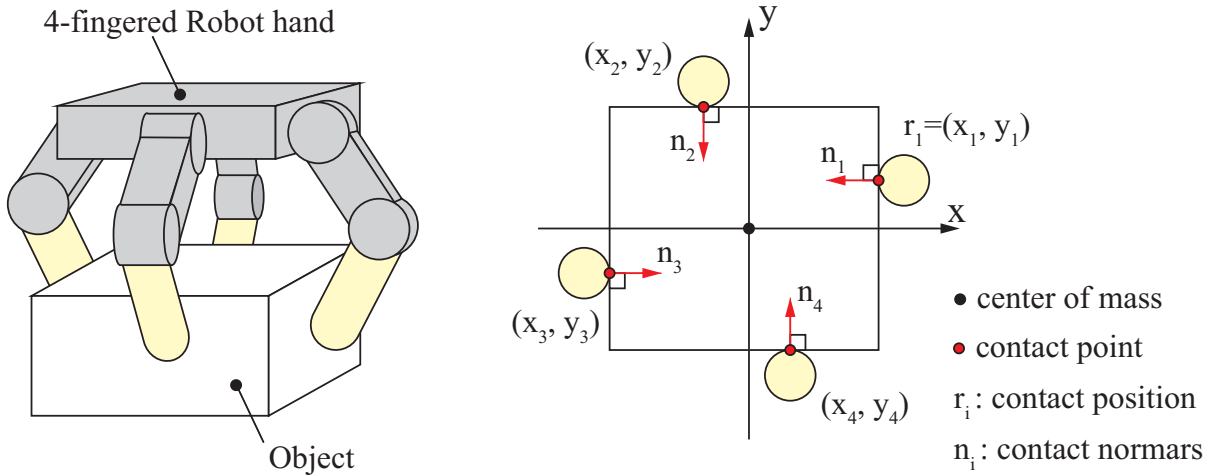


Fig. 2.5 Force closure grasping using a four-finger hand (in two dimensional plane)

列と安定性評価について以下で簡単に述べる．

図2.5に示すように，テーブル上の長方形の物体を4指のハンドで把持する場合を考える．なお，説明を簡単にするために，物体中心を重心位置とし，運動はテーブル面上の2次元平面に限定し，指と物体の摩擦による水平方向の力や重力の影響はここでは考慮しない．各指先の接触位置ベクトルを r_1, r_2, r_3, r_4 とし，正規化された接触力ベクトルを $\hat{n}_1, \hat{n}_2, \hat{n}_3, \hat{n}_4$ とすると，各接触点での力とモーメントの組 ω_i は式(2.1)で定義される．

$$\omega_i = \begin{bmatrix} \hat{n}_i \\ \vec{r}_i \times \hat{n}_i \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (2.1)$$

この力とモーメントの組はレンチと呼ばれ，式(2.1)で形成される空間をレンチ空間と呼ぶ．フォースクロージャを形成するためには，任意の外力・モーメント W_{ext} を打ち消すように指先力を与えれば良い．そこで，各接触力の大きさを f_1, f_2, f_3, f_4 とすると，物体に作用する外力・モーメントとの釣り合い式は式(2.2)となる．

$$W_{ext} = \begin{bmatrix} | & | & | & | \\ \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 & \omega_4 \\ | & | & | & | \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = Gf \quad (2.2)$$

この行列 G が把持行列であり，それぞれの列は各指先でのレンチにより構成される．

ここで，フォースクロージャな把持とするための条件は，式 (2.2) を満たし，かつ $f > 0$ であるが，把持行列 G は一般に非正方行列であるため，条件を満たす f の組み合わせは無限に存在する．そこで，把持行列 G の疑似逆行列を用いることで，任意の外力に拮抗するための指先力の一つを求める（式 (2.3)）．

$$f = G^+ W_{ext} \quad (2.3)$$

また，把持行列からフォースクロージャ把持を定量的に評価する手法の一つに ϵ -metrics がある． ϵ -metrics では，レンチ空間上の凸包を計算することで，把持レンチ空間 (GWS: Grasp Wrench Space) を形成し，この空間内に収まる最大球の半径により把持を評価する．

2000 年までは，把持の分野は明らかにモデル規範型を用いた研究が多く，物体とハンドの接触モデルの提案や ϵ -metrics に代表される指標を用いた安定性評価が主であった．しかしながら，これらの手法はシミュレーション上での評価のみに留まっていたため，実環境のロボットに適用可能かは不明であった．最近になり，いくつかの論文がこの問題を解析し，実環境においては ϵ -metrics は，良い把持推定器とならないと結論付けている [59]．Weisz らは， ϵ -metrics による安定把持を多数の実験により評価した．この結果， ϵ -metrics は姿勢誤差の影響を受けやすく，特に大きな対象物を把持する際にパフォーマンスが低下することを指摘している．

モデル規範型に基づく把持では，物体との接触を点接触と仮定し，クーロン摩擦モデルとし，物体を剛体モデルとしているため，実環境に適用した際に問題が生じる．これらの仮定は，把持解析を容易にする一方で，評価指標 ϵ -metrics の例のように，実環境の近似による力学解析の矛盾や曖昧さを生じさせる原因となる．このほか，ハンド運動学の正確なモデルや物体との位置関係を全て既知としているが，実際には運動学の不確かさや，センサのノイズにより，物体とハンド指先との位置関係や，物体の形状，位置・姿勢には誤差が生じるため，適切な把持を計画することは難しい．

2.3 行動規範型アーキテクチャ

モデル規範型アーキテクチャは制御系設計を明確かつ、単純にする一方で、計算時間が長い欠点のほか、環境をモデル化する際の誤差により、適切な行動計画が立てられない問題が徐々に明らかになってきた。

そこで、1986年にBrooksは、制御を縦に分割するのではなく、行動ごとにモジュール化し、並列・同時に実行する行動規範型アーキテクチャがロボットの制御に適していると考えた。行動規範型アーキテクチャは実環境を唯一のモデルと考え、センサ情報から直接、行動を生成する点がモデル規範型と大きく異なる。Brooksは自身が提案したアーキテクチャをサブサンプションアーキテクチャ^[60]と名付け、移動ロボットの他、多脚ロボットなどへの実装を行った。このアーキテクチャを用いたロボットは、最初のtortoiseの例で述べたように、内部の制御は非常に単純であるにも関わらず、障害物を避け、目標の位置に到達することが可能であり、またモデル規範型を用いた当時のロボットと比べるとその応答速度は格段に早かった^[58]。

2.3.1 サブサンプションアーキテクチャ

サブサンプションアーキテクチャの概念図を図2.1(Subsumption architecture)に示す。このアーキテクチャの最大の特徴は、各層の間での接続を利用して、上位層が下位層を包摂する(Subsume)点である。例えば、上位層が下位層に指令を割り込ませたり、信号を抑制することにより、上位層は下位層の実行時間を待たずに動作の生成が可能である。またこの仕組みにより、障害物の回避や探索などの異なる種類の動作が競合しないように設計できる。

Brooksが文献^[60]で提案したサブサンプションアーキテクチャの内部構造を図2.6に示す。同図の通り、各レイヤー内は複数のモジュールで構成されており、簡単な信号のやり取りを行う。同図右に示すようにレイヤー内の各モジュールの入力にはSuppressorと呼ばれる信号割り込み端子があり、また、出力にもInhibitorという信号の抑制端子を持ち、これらの端子を利用して上位の層は下位の層に信号を送る。文献によっては出力側にしか割り込み端子

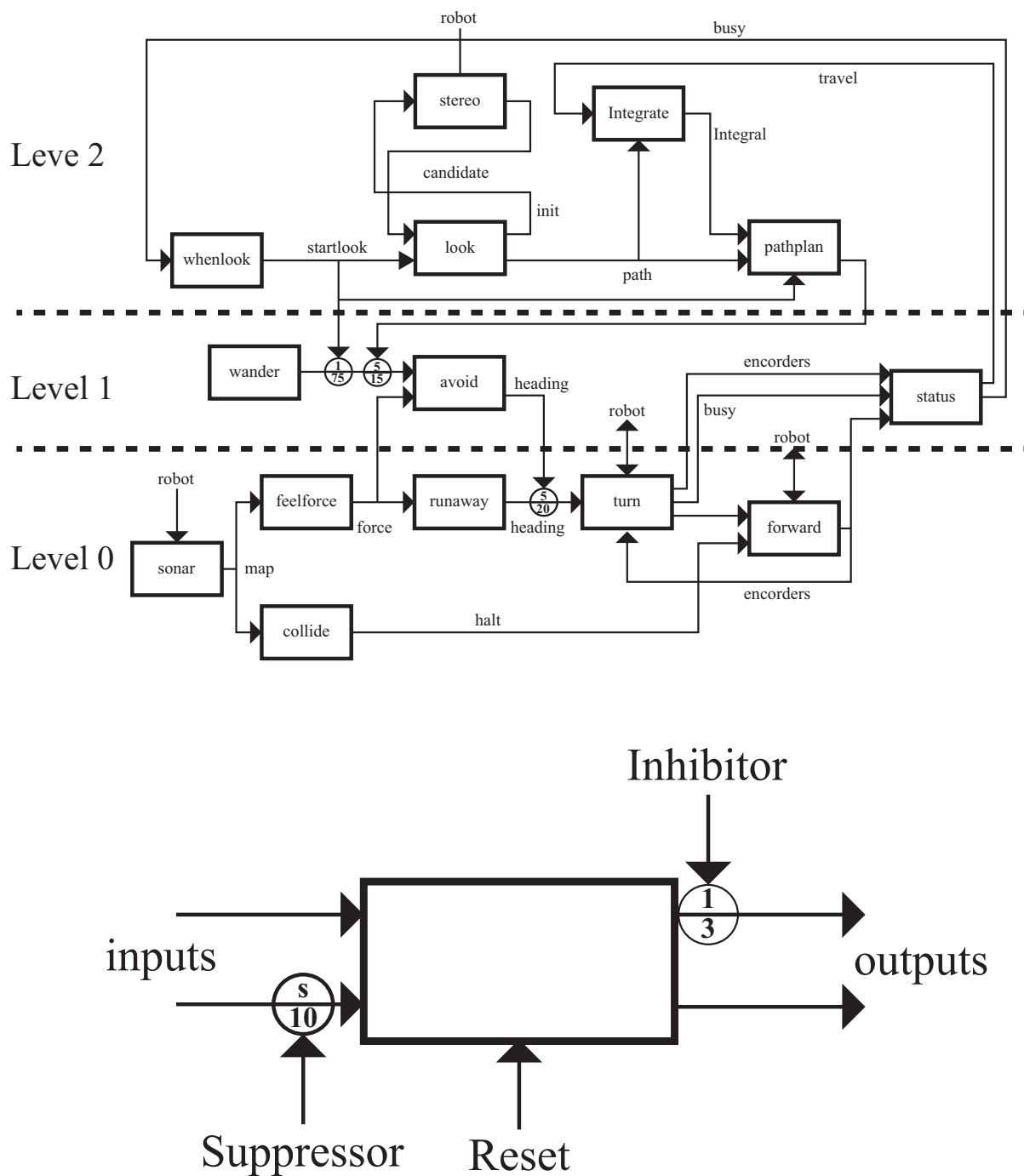


Fig. 2.6 Internal structure of Sub-sumption architecture [60]

を持たない場合もあるが，上位層が下位層を包摂するという基本原理は変わらないため，同じくサブサンプションアーキテクチャと呼ばれている [61].

サブサンクションアーキテクチャは主に移動ロボットにおいて成功したが、アームやハンドを搭載したロボットへの拡張はほとんど取り組まれなかった。

この一因としてサブサンクションアーキテクチャの設計の難しさがある。例えば、テーブル上の物体を把持する場合、もとの移動ロボットとしての機能の他に、物体の認識、リーチング、プリグラスプ、およびグラスプといった一過性の複雑なタスクも、センサ情報から直接、行動を決定する仕組みで構築しなければならない。この際に、各レイヤー間の接続や、信号割り込み端子の位置、および、その比率等の調整は全て設計者に委ねられるため、タスクが複雑であるほど、また、ロボットシステムが多自由度であるほどその設計は複雑になる欠点がある。

2.3.2 生物模倣型アーキテクチャ

この他、生物の運動指令モデルをロボット制御に応用する例があり、この中にはセンサ出力を直接、動作のタイミング制御に用いるものがあるため、一部の生物模倣型アーキテクチャも行動規範型に属する。この中で最もよく研究されているCPG(Central Pattern Generator)^[62, 63]を例に挙げる。

ヒト等の脊椎動物は脳ではなく脊椎内の神経細胞により、歩行パターンを生成しているという説があり、これは除脳ネコの足に刺激を与えると歩行のための筋刺激を誘発することからも有力視されている^[64]。この神経細胞の働きをモデル化したものがCPGであり、古くは1914年のBrownら^[62]によるHalf-center oscillator modelのほか、現在までに様々なモデルが提案されている。CPGのモデルは、自己抑制、相互抑制、感覚入力から構成され、フィードフォワード的にパターンを生成するのではなく、感覚入力に応じて信号パターンの周期を自動調整する特徴がある。CPGは周期的な指令を生成するという特性上、脚ロボットの歩行制御への応用が主であるが、一部、ハンドへの応用がなされており、多指ハンドの指を交互に動作させ、ハンド内で物体を操る動作にも利用されている^[65, 66]。しかしながら、把持研究で対象とする、リーチングやプリグラスプ、グラスプといった、非周期的で一過性の動作に用いることは難しい。

2.3.3 反射型アーキテクチャ

把持研究では，反射型制御が用いられることがある．これは，ハンド指先と物体との間で生じる位置や姿勢誤差をセンサ情報を基にその都度，補正する手法であるため，行動規範型に位置づけられる．

1973年にはすでにスタンフォード研究所のHillらによって，触覚センサによる把持位置・姿勢制御が提案されている^[52]．平行グリッパ上に触覚エレメントを実装し，触覚出力分布の偏りが“0”となるようアーム手先姿勢を調整することで，適切な把持姿勢への修正を可能としている．また，

2009年からは3Dセンシング分野の開発が進み，これに伴って，簡易的な視覚と反射型制御を組み合わせた把持研究(reactive grasping)が頻繁に取り組まれるようになった^[59]．

2010年にWillow garage Inc.のHsiaoらが，PR2ロボットの特徴投影ステレオカメラからおおよそその物体位置・姿勢を認識し，物体近傍で生じる誤差を平行グリッパの触覚情報を基に繰返し位置修正を行うことで把持を達成する手法を提案した^[54]．例えば，図2.8に示すように，指先の触覚センサが衝突を検知すると，平行グリッパを上方に退避し，横方向に位置をずらし，再度アプローチを行うことで把持位置を修正する．

Hillら^[52]とHsiaoら^[54]の例の通り，反射型制御には，センサダイレクト制御型と状態遷移型の2つがある．センサダイレクト制御型では，Hillら^[52]のように，センサ出力分布の偏りが“0”となるように，直接，アーム手先位置や姿勢を制御する．一方，状態遷移型では，Hsiaoら^[54]の手法のように，センサ出力から設計者があらかじめ定めたif-thenルールを基に，次の動作を決定する．本論文で提案する方式は近接覚センサの出力の偏りが“0”となるようにハンド関節角度を制御し，この角度情報を基に直接，アーム手先位置・姿勢を制御するため，センサダイレクト制御型に位置づけられる．

センサダイレクト制御型では，センサ出力により常に動作を調整するため，センサと制御器，およびロボットの応答周波数が十分高ければ，動作の応答時間を極限まで短くできる．これに対し，状態遷移型では，タスクが複雑になるほど，状態数が増加し，動作完了までの時間が長くなる欠点は

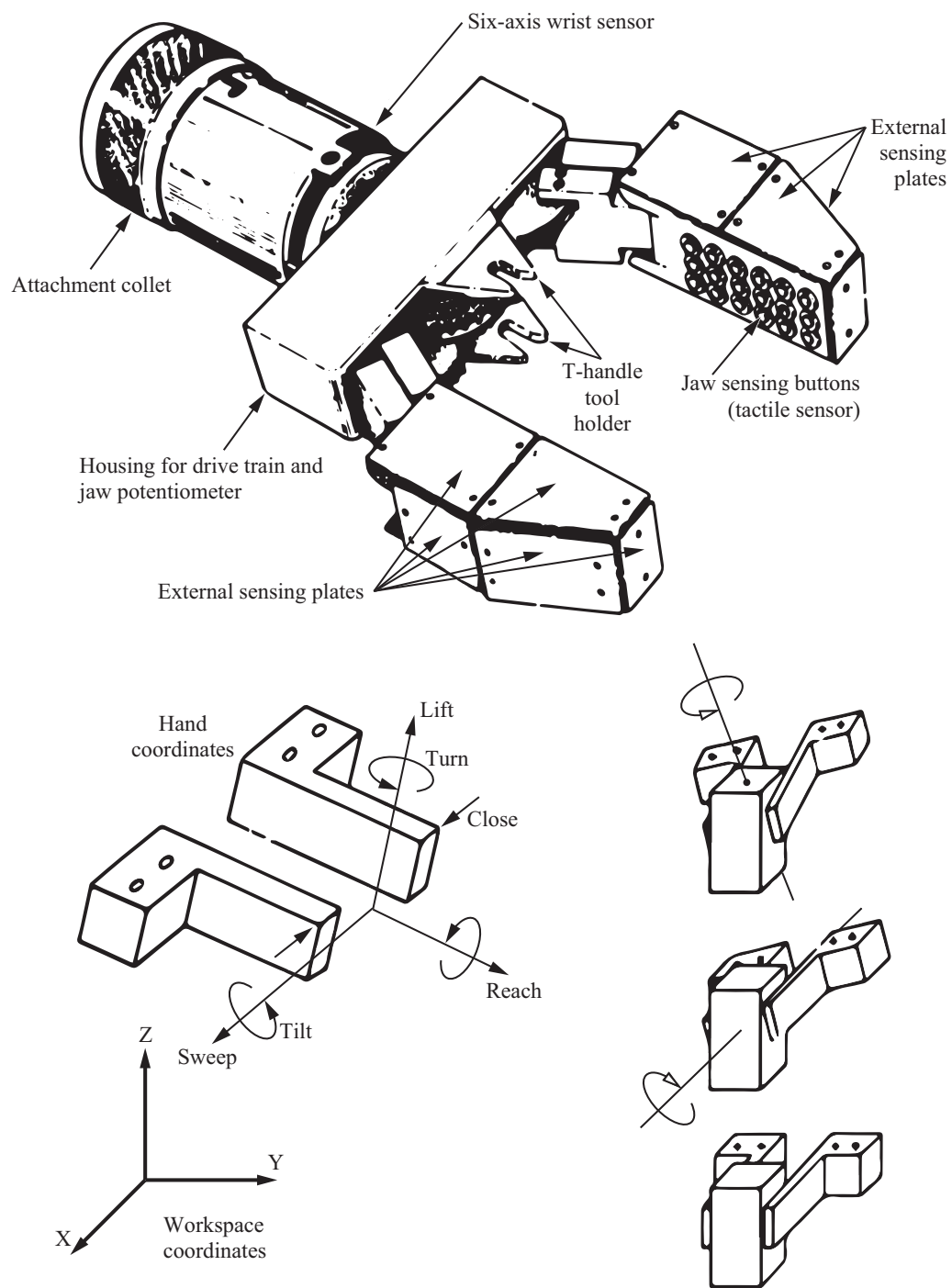


Fig. 2.7 Adjustment of grasping configurations based on sensor-directed control [52]

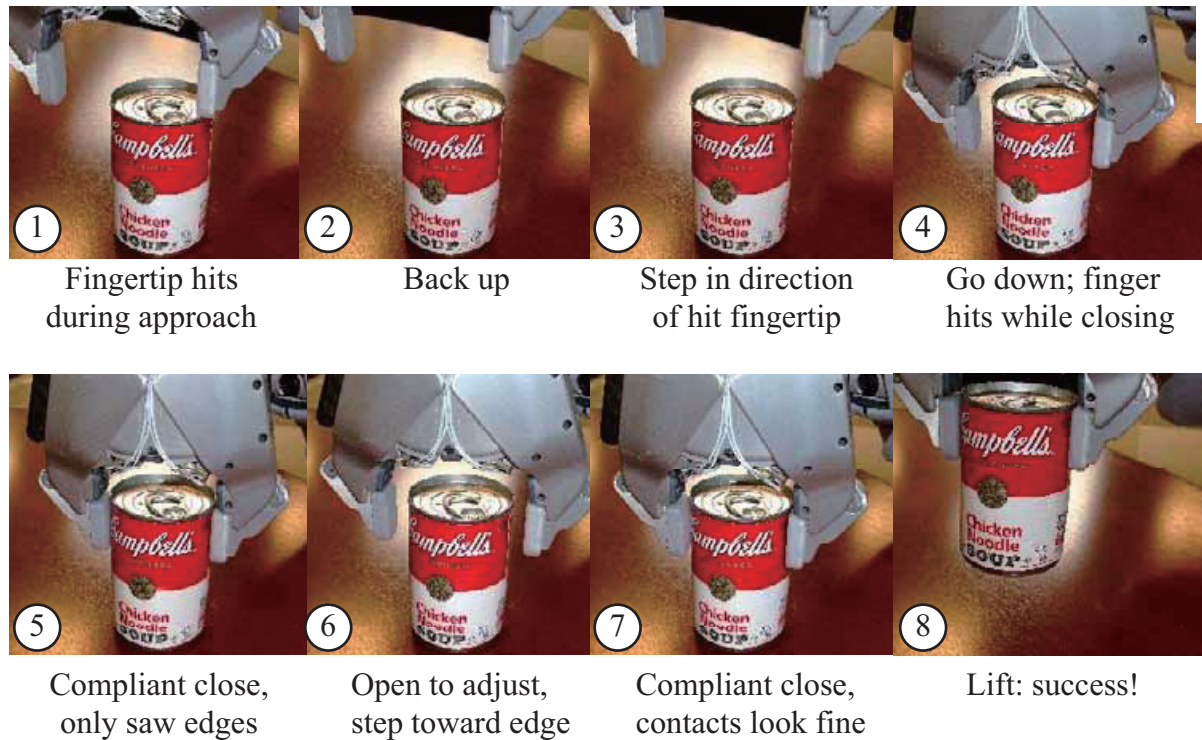


Fig. 2.8 Adjustment of grasping configurations based on State transition control [54]

あるが、適切なif-thenのルール設定により、センサダイレクト制御型よりも複雑な動作の設計が可能である。

しかしながら、両方式ともにセンサの検出限界やその特性の影響を強く受ける。把持では、柔軟物を扱うことや、動作の高速性が求められるが、触覚センサは閾値以上の接触力が得られないと接触を検知できないため、反射型制御の適用限界は、触覚センサの最小検出力に依存する指摘されている[54]。把持研究において、近接覚を用いた反射型制御の取り組みがいくつか行われている理由は、この触覚センサの検出限界の問題が一因であると考えられる。ただし、第1章、1.4.1節の関連研究でも述べた通り、他研究で用いられているハンドは、平行グリッパや劣駆動ハンドといった、自由度が1~4と比較的、低自由度のものであり、本研究のようにハンド8自由度、アーム手先6自由度をセンサダイレクト制御型で制御する試みは触覚、近接覚センサ含めても行われていない。

また，本論文で用いるセンサダイレクト制御型は，ハンドとアームの制御系が独立しており，相互に作用することで動作を生成する点が他の反射型制御の手法と異なる．本論文で用いる制御系の模式図を図2.9に示す²．おおまかな物体位置，姿勢を与える上位の制御系と，近接覚に基づくハンド，およびアームの下位の制御系により構成される．この下位の制御系がセンサダイレクト制御型である．まず，上位の制御系はKinectによる物体認識，または，人間の遠隔操縦に基づき，アーム手先位置とハンドの初期姿勢を与える．次に，下位の制御系は指先部の近接覚センサ出力を基にハンドの各指とアーム手先位置・姿勢の修正を行うハンドとアームの制御は独立，かつ並列に実行されるが，アーム制御はハンドの関節角度に依存し，また，アーム手先位置，姿勢の変化により，指先部のセンサ出力も増減するため，ハンド制御も影響を受ける．この相互作用により，ハンドの関節角度が可動限界に達した際も，アーム側で自然と手先位置・姿勢が調整されることにより，適切な把持位置・姿勢への修正を可能とする．このセンサダイレクト制御型

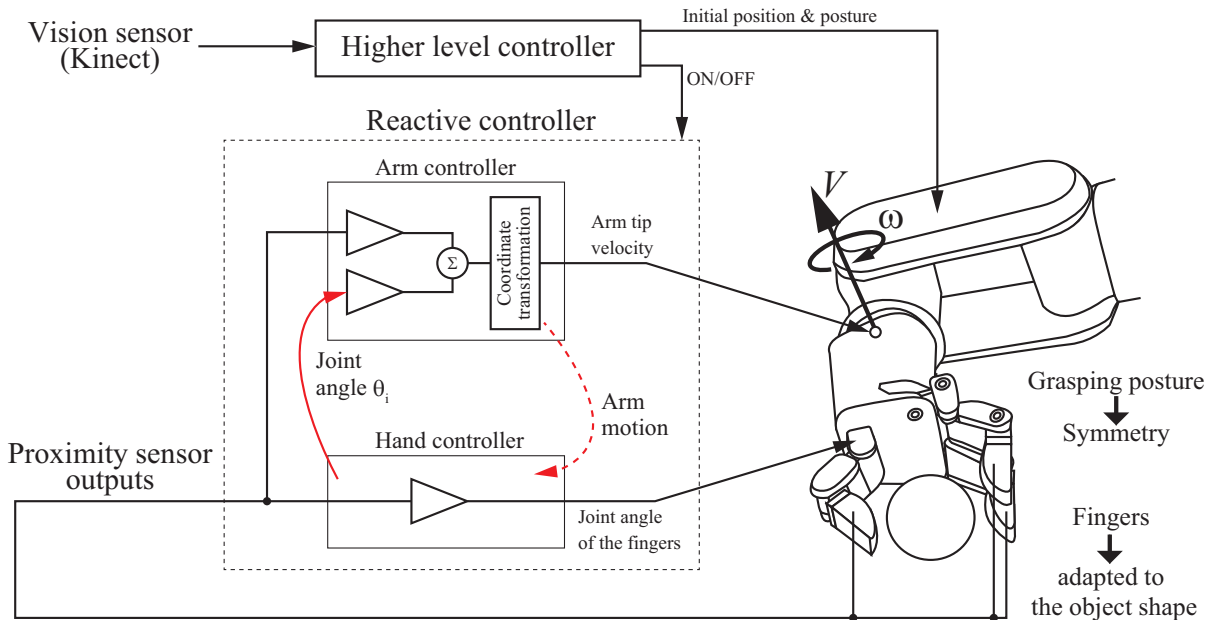


Fig. 2.9 Sensor-directed control for a multi-fingered hand and an arm using proximity sensor outputs (proposed in this thesis)

²本論文では，上記の制御系のうち，反射型制御（下位の制御系）の構築を行う

は，センサ出力を基にした把持制御で一般的に必要なとされる以下4つの動作^[59]を，それぞれモジュールに分け，同時・並列に実行することで達成する．

1. 把持点とアーム先端中心点の位置調整
2. 把持点にアプローチする把持方向の調整
3. ロボットハンドの手首角度の調整
4. 指の初期角度の調整

動作をモジュールごとに分け，並列に実行する点は，サブサンプションアーキテクチャと類似する部分があるが，最下層のハンド制御が一つ上の階層であるアーム制御に影響を与える点は異なる．また，センサダイレクト制御型の内部には，抑制や割り込みの接続が一切ないため，ハンド・アームの多自由度の制御が可能でありながら，アーキテクチャの実装が容易である長所も持つ．

2.4 まとめ

本章では，ロボットアーキテクチャの変遷を述べ，反射型制御の位置づけを明確にし，その分類を行った．

まず，センサ出力から動作を決定するまでの仕組みの違いから，モデル規範型，行動規範型，ハイブリッド型とに分け，行動規範型に属するものとして，サブサンプションアーキテクチャ，生物模倣型，反射型制御とに分類した．さらに，反射型制御を，センサ出力が“0”となるよう指令を生成するセンサダイレクト制御型と，if-thenルールに基づく状態遷移型とに分け，それぞれの手法の特徴を整理した．

本研究で用いる反射型制御は，センサ出力が“0”となるよう，ハンド関節角度とアーム手先位置・姿勢を制御するため，センサダイレクト制御型に位置づけられる．ただし，他のセンサダイレクト制御型は，平行グリップなどの単純なロボットハンドへの応用のみに留まっているのに対し，本研究では，多指多関節ハンドとアームの制御を可能としている点が異なる．また，行動ごとに制御モジュールを設計し，複数のモジュールを同時に実行することで動作を生成する点はサブサンプションアーキテクチャと類似する部分があるが，最下層のハンド制御が一つ上のアーム制御に影響を与える点が異なる．また，サブサンプションアーキテクチャでは，層間での接続と割り込み端子の設計が問題になるが，本研究で用いるセンサダイレクト制御型は，各層の制御が独立しているため，設計が容易であるという特徴を持つ．

第3章

指先部近接覚センサの設計

本論文では，指先部の近接覚センサの出力を基に，物体形状に倣って高速にハンドの各指を配置し，同時に，アームの動作により，手先位置・姿勢の誤差を修正する．この際，指先部の近接覚センサ出力で直接，ハンドの各関節，および，アーム手先位置と姿勢を制御するため，物体面の傾きや距離に対するセンサ出力特性が重要となる．

そこで，本章では，ハンド指先部に適した近接覚センサの設計を行う．以降ではまず，触・近接覚センサを備えたロボットハンド全体の概要と近接覚センサによる物体面の傾き検出原理を述べ，次に，図3.1に示すように，(a) 指先形状の決定，(b) センサ実装面の設定，(c) 素子配置設計の順に説明する．

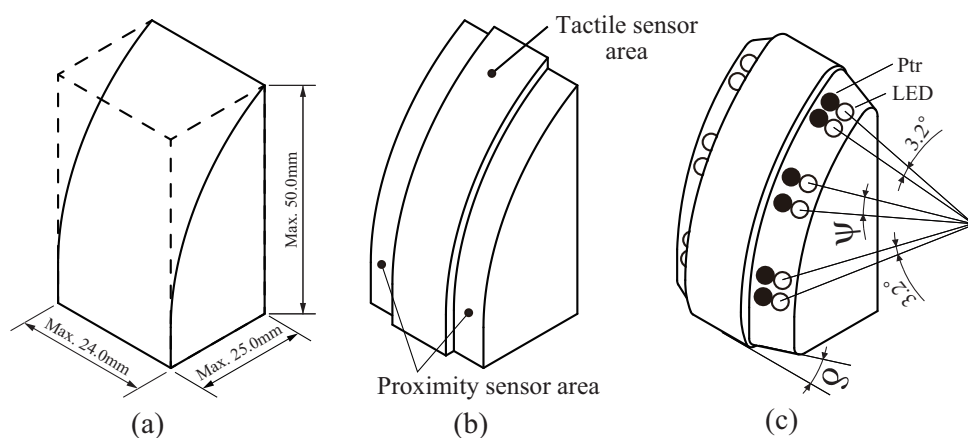


Fig. 3.1 Design step of a fingertip sensor: (a)Design of a fingertip shape, (b)Area setting of a proximity and a tactile sensor, (c)Design of a layout of the proximity sensor elements

3.1 触・近接覚統合型ハンド

本論文で用いたロボットハンドとセンサの外観を図3.2に示す．ハンドはハーモニック・ドライブ・システムズ社製の3本指のものを使用している．なお，ハンド・アームシステム全体構成の詳細については5章に記載している．

ハンドの手掌部と各指先には，抵抗ネットワーク型近接覚センサアレイ^[41, 43]（以降では近接覚センサと呼ぶ）が搭載されており，また，本論文では言及しないが，各指先には触・すべり覚センサ^[50]を実装してある．この近接覚センサは，天本^[41, 43]らにより基本回路が提案された．さらに，向山^[45, 48]らにより，専用のシミュレータの開発がされ，アプリケーションに応じたセンサ設計が可能となった．また，触・すべり覚センサは勅使河原ら^[50]が開発したものである．この中で，図3.2右の指先部の近接覚センサの設計・開発

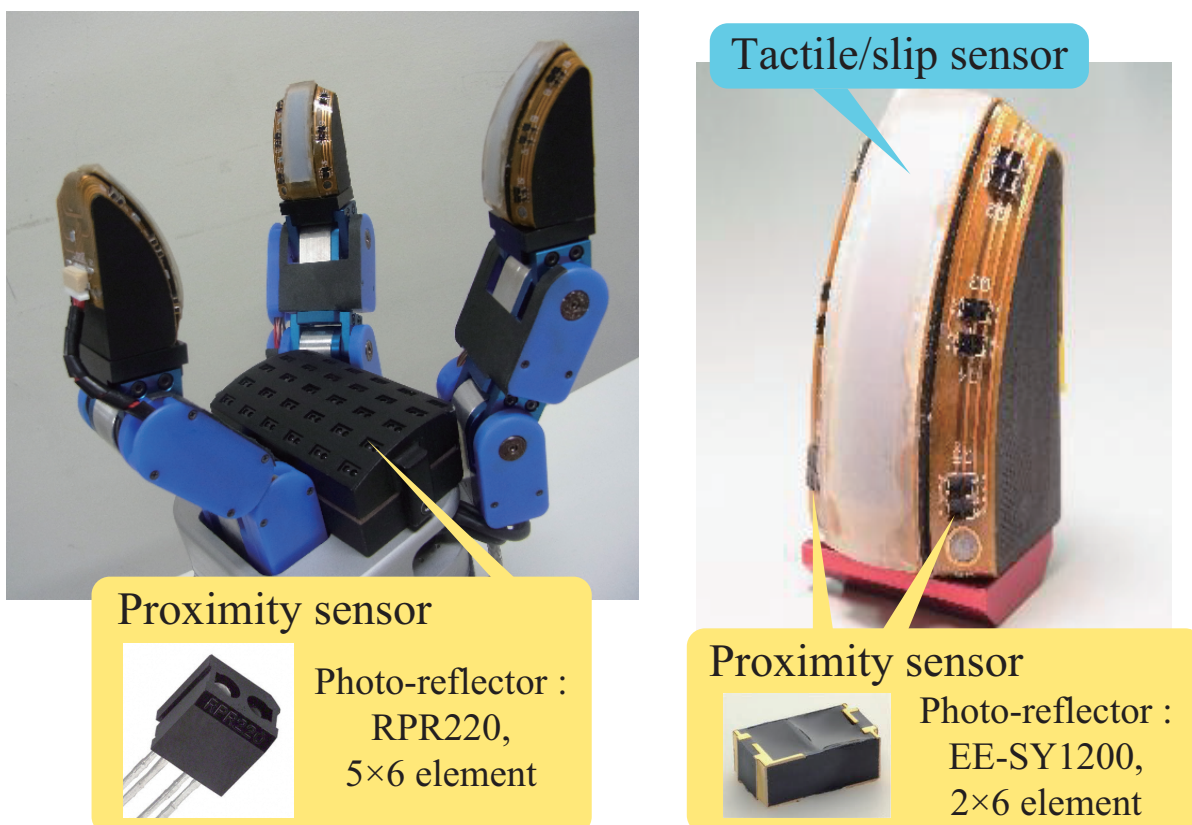


Fig. 3.2 Overview of a 3-finger Robot hand (8 D.O.F) with a tactile/slip sensor and proximity sensor elements (photoreflector)

が本論文の成果である。

把持制御においては，手掌部の近接覚センサの出力は対象物の中心と掌中心との位置合わせのために使用し，指先部の近接覚センサは対象物表面と指先面との姿勢調整，および，接触に至るまでの指先位置制御のために利用する。

3.1.1 近接覚センサの回路構造と計測原理

近接覚センサはアレイ状に多数配置したフォトリフレクタを検出素子とする光学式のセンサである．各フォトリフレクタの反応量の偏りから物体表面の姿勢誤差を，反応量の総量から距離を検出できる^[41, 43]。

3×3検出素子の近接覚センサの構造を図3.3に示す．フォトリフレクタは赤外LEDとフォトトランジスタを一对とする素子である．赤外LEDより光を照射し，物体面での反射光をフォトトランジスタで受光することで，各フォトトランジスタに物体との距離に応じた光電流が生じる．光電流は上層の抵抗回路網，各素子，下層の抵抗回路網を介して流れ，上下層の抵抗回路網には電流分布が生じる．回路端部の4箇所の電圧を計測することで，この電流分布の中心位置を導出でき，この値から近接する物体の位置を検出できる．また，フォトトランジスタが受光する赤外光の量は物体との距離に応じて変化することから，総電流量よりセンサと物体間の距離を推定可能である^[41, 43]。

具体的には，図3.3のように，基準電圧源の電圧を V_0 ，抵抗回路網の内部抵抗を r ，外部抵抗を R_0 ， x, y 方向の検出素子数を m, n ，回路端部4箇所の電圧を $V_{S1}, V_{S2}, V_{S3}, V_{S4}$ とすると，電流分布の中心位置 x_c, y_c および，総電流量 I_{all} は，以下の式(3.1)~(3.3)によって求めることができる¹．なお， x_c, y_c は抵抗回路網の中心を原点として $[-1, 1]$ の範囲に正規化された値である．便宜上，以降では電流分布の中心位置を位置出力 (x_c, y_c) と呼び，総電流量 I_{all} を距離出力と呼ぶ。

¹センサ出力 (x_c, y_c, I_{all}) の計算式の導出は付録A.1に記載する

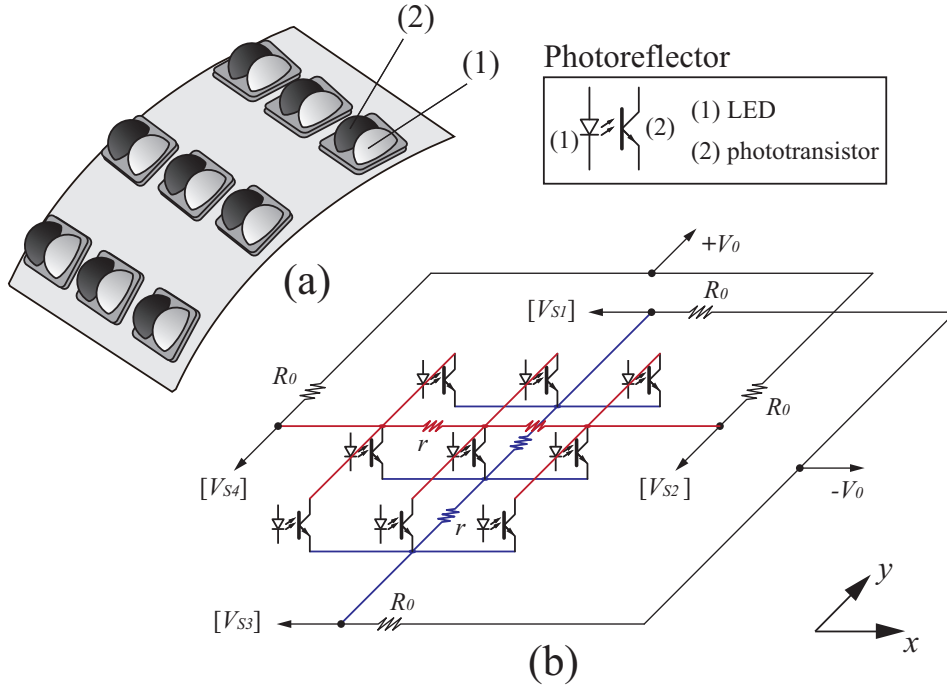


Fig. 3.3 (a)Overview of Resistor Network Structure Proximity Sensor (RNSPS),
(b)Schematic diagram of 3×3 matrix of RNSPS. In this example $m=3, n=3$

$$x_c = \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{r} \frac{2}{m-1} \right) \frac{V_{S2} - V_{S4}}{I_{\text{all}}} \quad (3.1)$$

$$y_c = \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{r} \frac{2}{n-1} \right) \frac{V_{S1} - V_{S3}}{I_{\text{all}}} \quad (3.2)$$

$$I_{\text{all}} = \frac{2V_0 - V_{S1} - V_{S3}}{R_0} = \frac{2V_0 + V_{S2} + V_{S4}}{R_0} \quad (3.3)$$

近接覚センサはアナログ回路で構成されるため，その応答時間は，検出素子の立ち上がり，立下り時間により決定される．フォトランジスタを用いた場合，センサ全体での応答時間は1ms以下であり，一般的なカメラ等の視覚センサと比べると，取得情報の処理・解析に要する時間がはるかに短い．

この他，センサ素子を離散的に配置するため，複雑な表面形状のロボットにも実装可能であることと，センサ素子数や面積と無関係に，配線数が6本

と省配線であることなど，ロボットハンドやアームへの実装上，有利な特徴を有する．

3.1.2 近接覚センサを用いた物体面の傾き検出^[44]

把持物体は，センサより十分大きな面を持ち，面から光の反射があり，かつ表面の反射率分布がほぼ均一であるものを対象とする．この場合，近接覚センサの位置出力 (x_c, y_c) から物体表面と指先間の傾きを検出できる^[44]．この検出原理について説明する²．

近接覚センサの電流分布は，光電流がより多く流れる素子側，つまり，物体とより接近している側に偏る．このため，センサよりも対象物が大きい場合，位置出力 (x_c, y_c) は，物体面の傾き方向とその大きさに依存して変化する．図3.4(a)の座標関係で指先面にセンサを実装した場合，指先のロール角周りの物体面の傾きは，位置出力 y_c に反映される．即ち，図3.4(b)に示すように，センサ面と物体面が平行であるときは $y_c = 0$ となり，平行な姿勢から傾いていくと，傾き方向に応じて y_c は正負の値に偏る（同図(c)）．この関係より，物体と指先間のロール角周りの傾きを y_c から検出できる．同様に，指先のピッチ角周りの物体面の傾きは，位置出力 x_c に反映される．図3.4(d)に示すように，センサ原点を通る指先曲面の接線（図中線A）と物体面が平行であるとき， $x_c = 0$ となる．この姿勢から傾いていくと，傾き方向に応じて x_c は正負の値に偏る（同図(e)）．この関係より，物体と指先間のピッチ角周りの傾きを x_c より検出できる．

以上より，物体と指先の2軸周りの傾きを位置出力 (x_c, y_c) から検出可能であり， (x_c, y_c) が両方とも“0”になるように指先姿勢を制御することで，物体と指先を一定の姿勢に保つことができる．この姿勢は，物体面と指先面が互いに向かい合った状態であるので，以降では指先面と物体面が正対していると呼ぶ．

このように近接覚センサは，センサ面に入射する反射光の偏りに基づい

²センサより対象物が小さい場合は，位置出力 (x_c, y_c) から物体中心位置を検出できる
[41, 43]

て，物体面との傾きを検出する．従って，物体面が曲面の場合においても，図3.5に示す通り，センサ面原点からの垂線（図中線B）と曲面の中心が一致する姿勢で， (x_c, y_c) は $(0,0)$ に収束する．そして，この姿勢を原点として x_c, y_c は正負の値に変化する．よって，物体面が曲面の場合も同様に，位置出力 (x_c, y_c) から2軸周りの傾きを検出可能である．

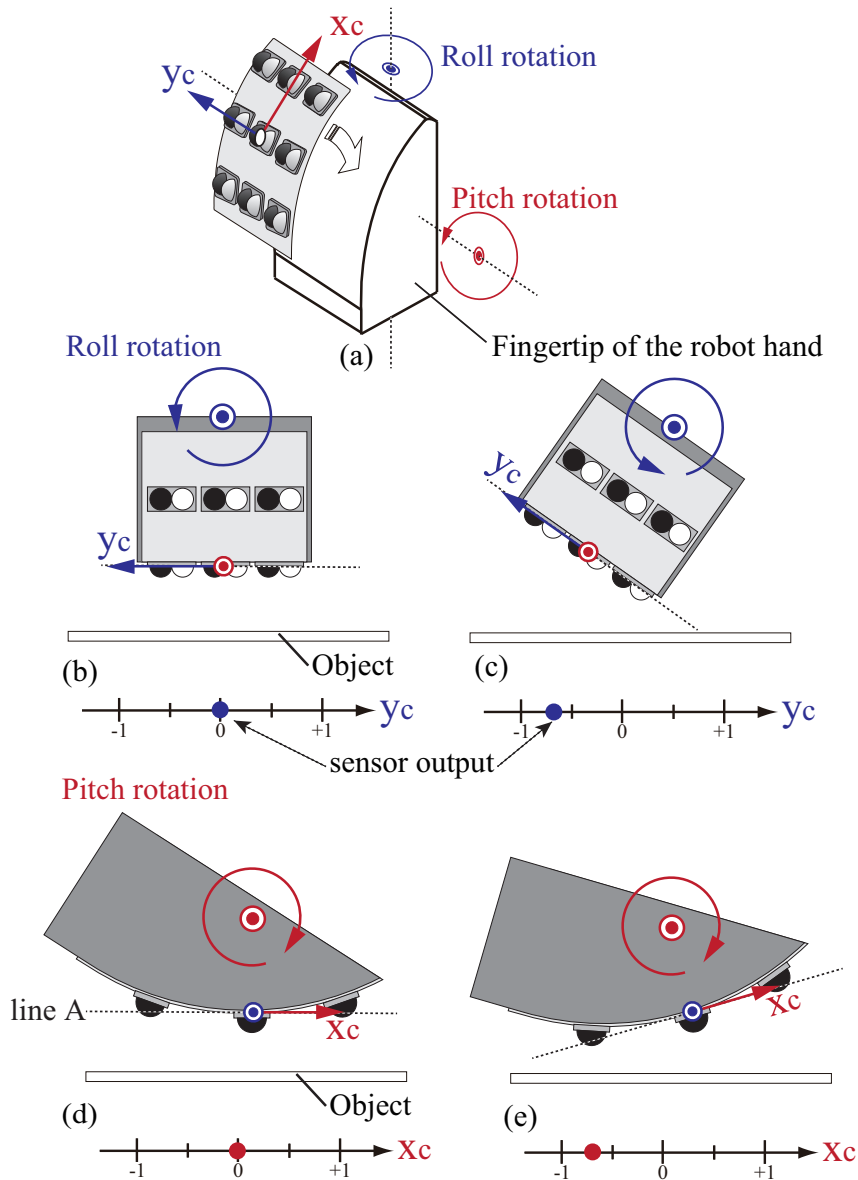


Fig. 3.4 Tilt detection of the object's plane based on position output x_c, y_c

3.2 指先形状の設計

指先部に近接覚センサを実装するに当たり，まず，指先形状を設計する必要がある．ハンド指先は，搭載可能なサイズ内で，大小さまざまな把持対象物を掴める形であることが望ましい．本研究で用いるロボットハンドに搭載可能な最大の指先寸法は， $25.0 \times 24.0 \times 50.0 \text{ mm}$ である．そこで，この寸法内で大小様々な物体を掴めるように，指の先から根元にかけて曲面を持つ図3.1(a)の指先形状とした．このような指先形状とすることで，パワーグリップやプレシジョングリップ等，掴み方のバリエーションを多くとることができる．

3.3 センサ実装領域の設定と検出素子の選定

そして，この指先上にすべり覚センサと近接覚センサを共存させるために，指腹表面の形状は図3.1(b)の形状とした．指腹中央の凸部分にすべり覚センサを実装し，両側の窪んだ部分に近接覚センサの検出素子であるフォ

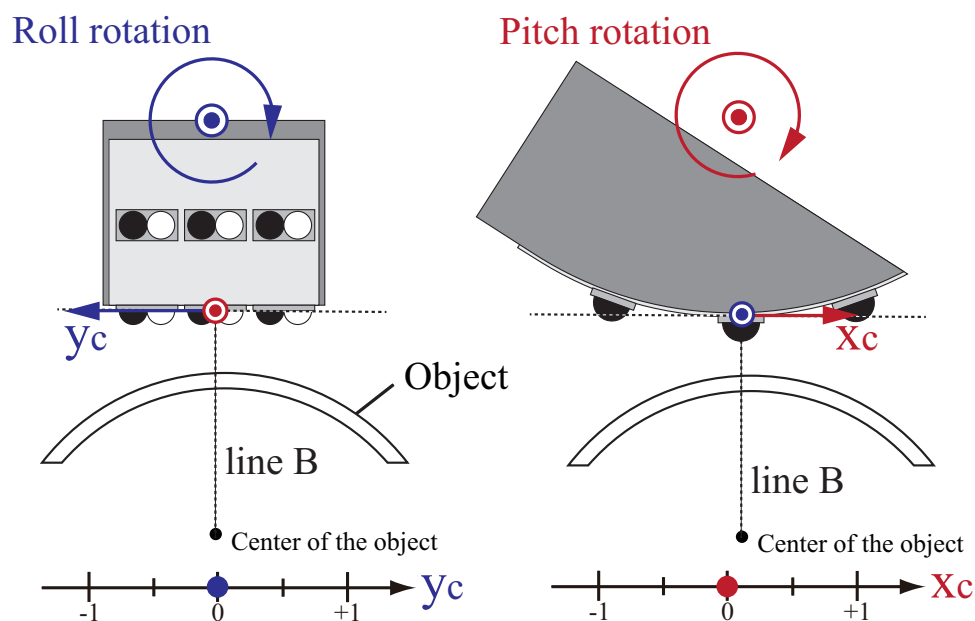


Fig. 3.5 Tilt detection of the object's curvature surface based on position output x_c, y_c

トリフレクタを配置する．このフォトトリフレクタは，限られた実装スペースに配置するために，まず小型であることが必須条件であり，このほか，応答時間が短いことや，近距離までセンシング可能，傾き検出に適した特性を持っている必要がある．そこで，これらの条件を満たすフォトトリフレクタとしてOMRON社製の“EE-SY1200”を用いた．EE-SY1200の外観・寸法・内部回路を図3.6に，また，絶対最大定格と特性を表3.1・3.2に示す．EE-SY1200は，外形が $1.9 \times 3.2 \times 1.1$ mmと小型であり，また，出力の立ち上がり，立下り時間は $30 \mu\text{s}$ と応答特性も良い．

EE-SY1200の光電流と距離の関係を図3.9に示す．グラフは，縦軸が物体からの反射光強度に依存する光電流の値であり，横軸が物体との距離である．光電流が最大値となる距離，すなわち焦点距離は 0.6 mm と短く，近距離までセンシングが可能である．

また，EE-SY1200のLED，フォトランジスタの光軸を傾けた際の放射輝度，および受光強度特性を図3.10・3.11に示す．図3.10は縦軸がLEDの放射輝度であり，横軸は光軸の傾き角度である．一方，図3.11の縦軸は光源からの入射光によりフォトランジスタに流れる光電流の値を示しており，横軸が光軸の傾き角度である．放射輝度，光電流はそれぞれ角度 0° で最大値を取り，傾き角度の増加につれて減少している．LEDの放射輝度が最大値の50%となる角度，すなわち半値角 $\theta_{1/2}$ は，正の角度で 66.7° ，負の角度で -56.6° であり，この間の角度（半値全角と呼ぶ）は 123.3° である．同様に，フォトトラ

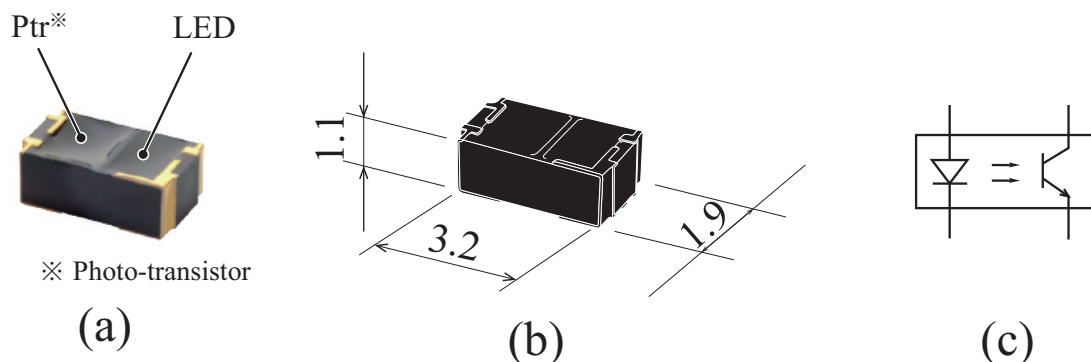


Fig. 3.6 Photo-reflector “EE-SY1200”: (a)Overview, (b)Size [mm], (c)Schematic symbol

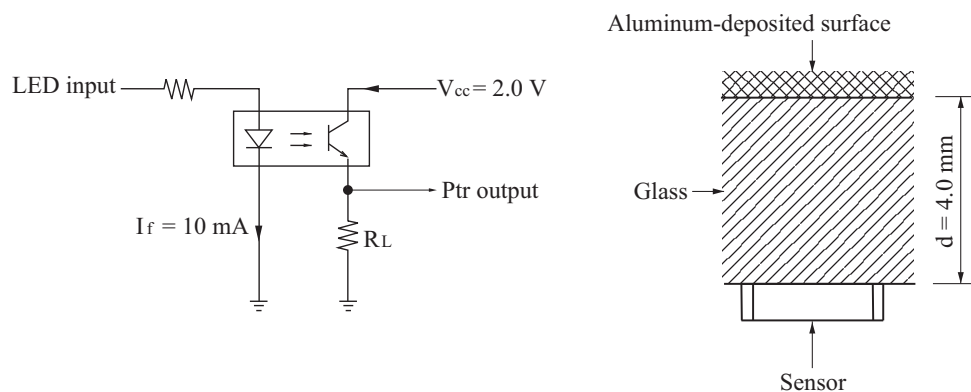


Fig. 3.7 Light current measurement setup diagram of photo-reflector EE-SY1200

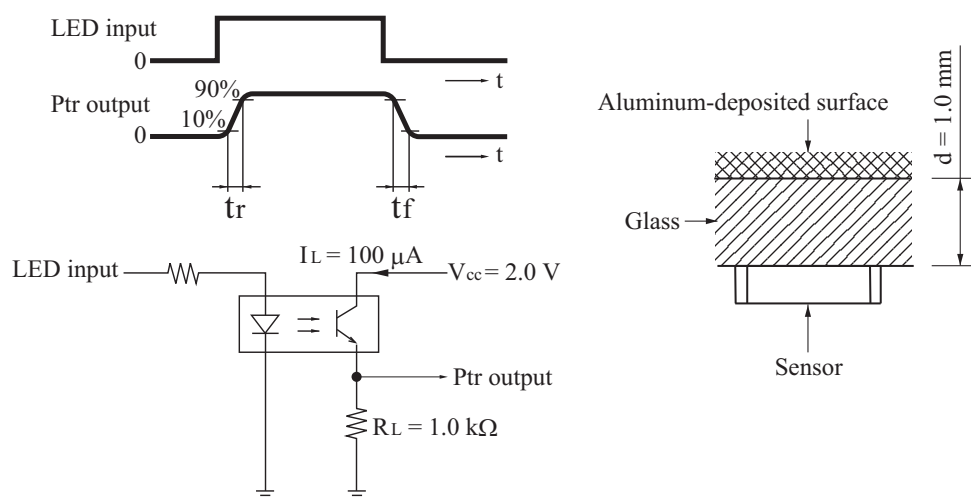


Fig. 3.8 Response time measurement circuit of photo-reflector EE-SY1200

Table 3.1 Absolute maximum rating of photo-reflector EE-SY1200

Item	Symbol	Rated value	Unit
LED Forward current	I_F	50.0	mA
LED pulse forward current	I_{FP}^2	500.0	mA
Ptr ³ collector-emitter voltage	V_{CEO}	30.0	V
Ptr ³ collector-emitter voltage	I_C	20.0	mA

Table 3.2 Electrical and optical characteristics of photo-reflector EE-SY1200

Item	Symbol	Value	Unit	Condition
LED Forward voltage	V_F	1.2	V	$I_F = 20 \text{ mA}$
LED peak emission wavelength	λ_p	940	nm	-
Ptr light current	I_L	200~1000	μA	See Fig3.7
Ptr ² peak spectral sensitivity wavelength	λ_p	850(Typ.)	nm	-
Ptr rising time	t_r	30.0	μs	See Fig3.8 参照
Ptr falling time	t_f	30.0	μs	See Fig3.8 参照

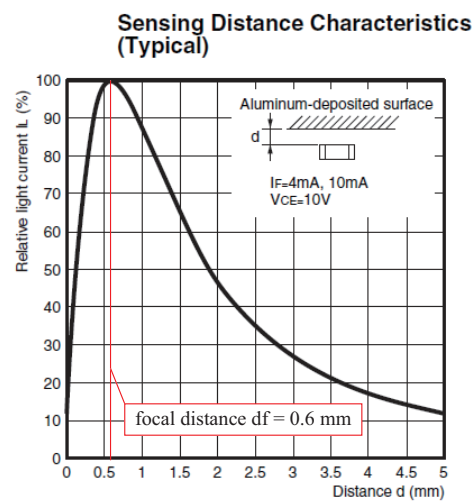


Fig. 3.9 Characteristics between distance and output current of photo-reflector EE-SY1200

ンジスタの半値角 $\theta_{1/2}$ は、正の角度で 53.3° 、負の角度で -49.2° であり、半値全角は、 102.5° である。これは、例えばフォトリフレクタ “RPR-220”⁴ の半値角 $\theta_{1/2} = \pm 15^\circ$ と比較すると広指向性であり、EE-SY1200 の照射光は拡散しやすく、また広範囲の反射光を受光しやすい。従って、EE-SY1200 を多数配置し

²パルス幅 $10 \mu s$ 以下、繰り返し 100 Hz

³フォトトランジスタ

⁴ローム社製のフォトリフレクタ

てセンサアレイを構成した場合，物体の形状や大きさといった像をシャープにとらえることは難しい．だが一方で，広範囲の反射光を受光することにより，物体表面の微小な凹凸や模様情報が平均化されるため，物体表面の特徴によらず，ロバストな傾き検出が期待できる．

以上の通り，EE-SY1200を用いることで，小型，高速応答，近距離センシングが可能となり，また，物体表面の特徴によらないロバストな傾き検出が期待できるため，ハンド指先部の検出素子に適している．

図3.1(b)のすべり覚センサ実装部分の段差の高さは，EE-SY1200の高さ1.1 mmと焦点距離0.6 mmを足した寸法，1.7 mmとした．これにより，物体表面とすべり覚センサ面が接触する距離0 mmまで，センシングが可能な構成としてある．

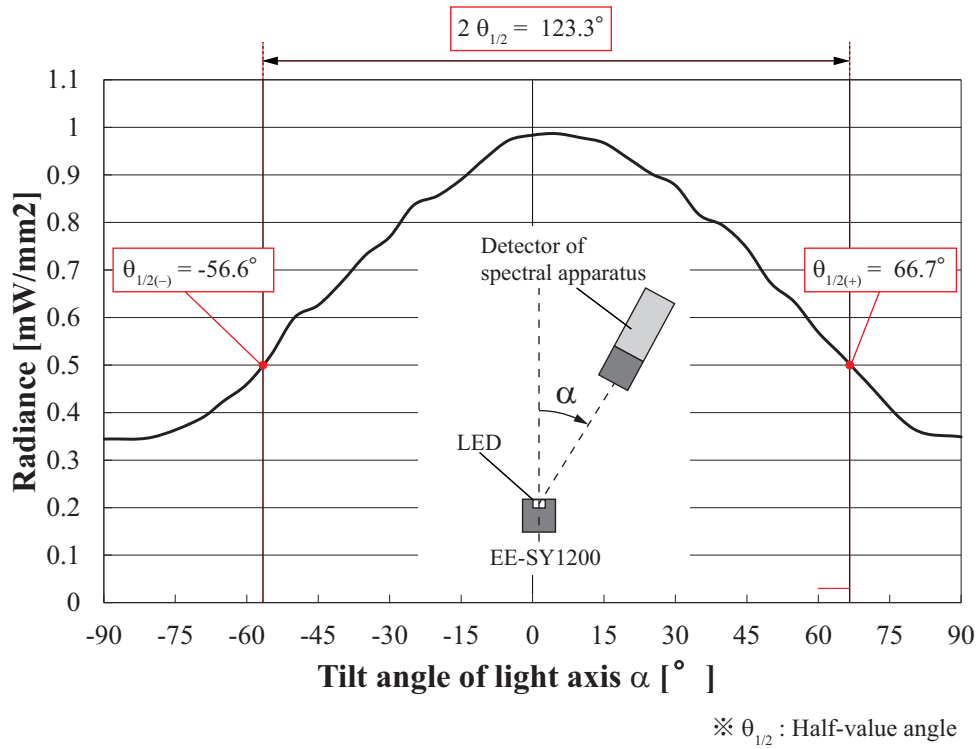


Fig. 3.10 LED directionality of photo-reflector EE-SY1200

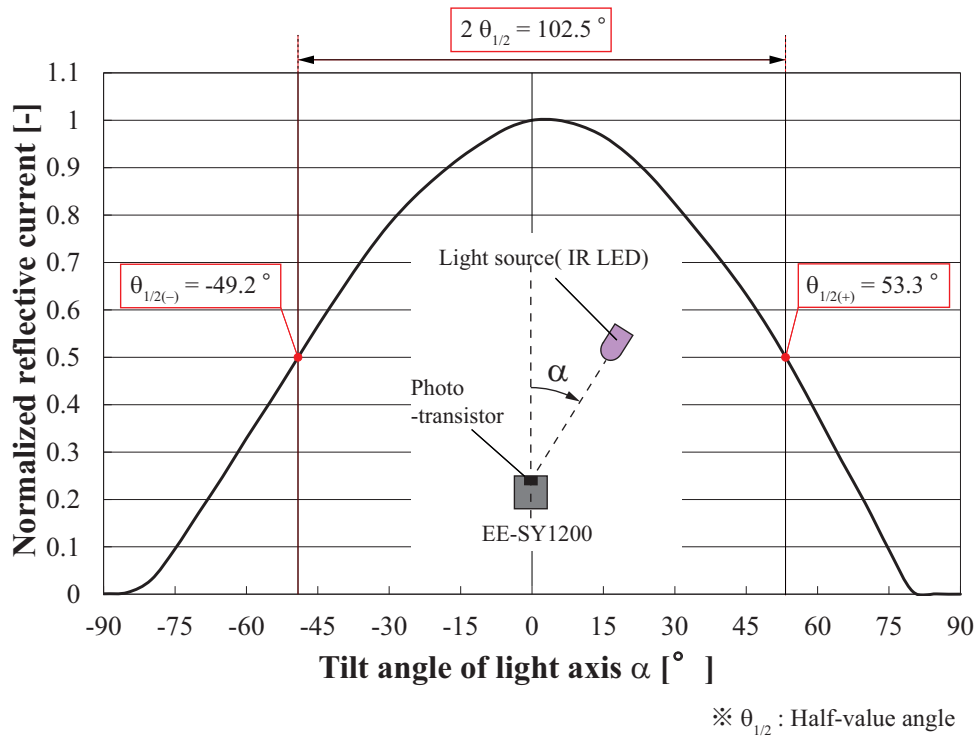


Fig. 3.11 Ptr. directionality of photo-reflector EE-SY1200

3.4 近接覚センサの素子配置設計

ハンド指先部のセンサは，Kinect等の視覚センサにより生じる数ミリ～数十ミリオーダの推定誤差を検出する必要がある．この際，1)物体と指先間の傾きを表すセンサ出力(x_c, y_c)は距離数十ミリ程度から感度よく計測できること，2)物体と指先間の距離計測値 I_{all} は物体と指先の姿勢による影響が少ないこと，が姿勢と距離を同時に制御するためには望ましい．そこで，この2つの出力特性を満たすためのフォトリフレクタの配置を考案し，光学シミュレータ上で検証した．以下では，使用した光学シミュレータを述べた後，1),2)のセンサ特性に影響を与える設計パラメータとこれらを変化させた際の影響について説明する．そして，光学シミュレーションを行った結果と採用した素子配置について記す．

近接覚センサアレイ用シミュレータ

光学シミュレータは，向山ら^[45, 48]が開発した近接覚センサアレイ用のレイトレーシングシミュレータを用いた．このシミュレータでは，LED—物体面—フォトトランジスタの間での光の伝搬経路を離散的なレイ（光線）とみなし，各光線を追跡することで，センサ面に入射する反射光分布，およびセンサ出力をシミュレーションする．LEDのような光源から照射される赤外光は互いに干渉を起こさないため，図3.13に示すように，各LEDごとにシミュレーションを行い，それぞれの結果での光電流分布を足し合わせることで，全LEDが発光している際に各素子に生じる光電流を計算する．そして，各素子に流れる電流値から，電流一次モーメントと総電流量を算出し，位置出力 x_c, y_c と距離出力 I_{all} の値をシミュレーションする．なお，身の回りの多くの対象物の表面は拡散反射成分が支配的であるため，本シミュレータでは，対象物表面の光の反射特性は完全拡散反射としている．図3.13に示すように，このモデルでは，一方向から入射した光が全方向に向かって拡散して反射する．

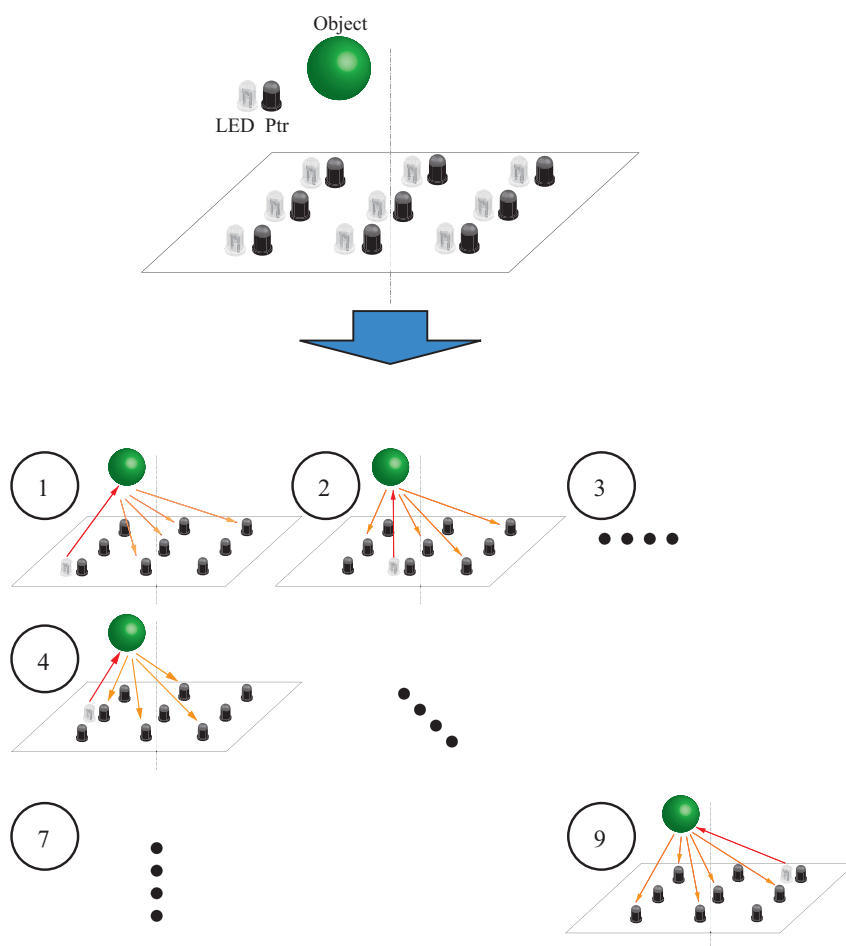


Fig. 3.12 Split calculation on our ray tracing simulator

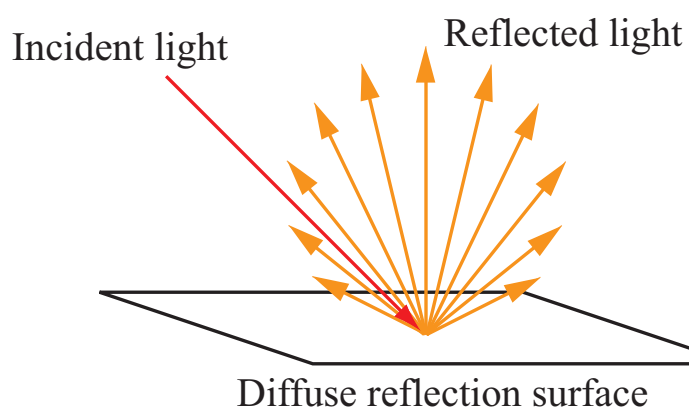


Fig. 3.13 Schematic diagram of diffuse reflection model

1) 位置出力 y_c についての検討

まず、1)を達成するために指先の幅方向に沿った検出素子の配置について検討した．指先部の近接覚センサにおいては，EESY1200のように焦点距離が短いものを使用する方が，物体面の傾きと距離を近距離までセンシングする上で有利である．しかしながら，短焦点距離の素子は同時に，広い指向特性を持つため，物体面からの反射光は広範囲に拡散しやすい．このことは，物体面の傾き検出を行う際，位置出力 y_c が遠距離で低下する原因となる．図3.14左に示すように，広指向性の素子を指先センサに用いると距離30 mm程度の遠方において，センサ面に入射する反射光の偏りが小さくなり，これにより位置出力 y_c の値が減少してしまう．図3.15に示すように，以前の指先センサ^[44]では，素子を同一面上に取付け角度なし ($\delta = 0$) で素子配置を行っていた．このため，傾いた物体面が30 mm以上離れた距離にある場合，反射光強度の偏りが小さくなり，位置出力 y_c の値が低下してしまう問題があった．

そこで，このような条件下においても十分大きな位置出力 y_c が得られるように，実装面角度 δ を設けることを考えた．図3.14右に示すように，フォトリフレクタの光軸を角度 δ 傾けることで物体面が傾いている場合，左右素子列における反射光の光路差が大きくなるため，位置出力 y_c の値が増大することになる．

この角度 δ によるセンサ出力特性の変化を光学シミュレータで検証した．図3.16に示すように，シミュレーション条件として，対象物は指先より十分大きな平面とし，一定の実装面角度 δ ごとに距離 d と角度 θ を変化させ，センサ出力を計算した．角度 δ を増加させた際の位置出力 y_c の変化を図3.17に，距離出力 I_{all} の変化を図3.18に示す．図3.17は縦軸が位置出力 y_c ，横軸は角度 θ であり，距離30 mmでの結果を示している．図3.18は縦軸が距離出力 I_{all} ，横軸が距離 d であり，角度 $\theta = 0^\circ$ における結果である，なお，距離出力 I_{all} については， $\delta = 0^\circ$ でのピーク値を基に，各 δ での結果を正規化してある．図3.17より，角度 δ を大きくするほど，位置出力 y_c の変化幅は拡大しており，狙い通りの特性が得られている．しかしながら，距離出力 I_{all} は逆に角度 δ の増大とともに減少している．距離出力 I_{all} は素子に流れる全光電流量であるため，角度 δ を設けたことにより，センサに入射する反射光強度が減少し，こ

れに伴い, I_{all} も低下した結と考えられる.

以上の結果より, 位置出力と距離出力はトレードオフの関係にあり, 位置出力 y_c の値を十分確保でき, かつ, 距離出力 I_{all} が低下しすぎない角度 δ を選ぶべきである. そこで, 位置出力, 距離出力ともに最大値の50%以上の値を見込めるように角度 δ を選ぶことにし, 位置出力の最大値”1”に対して, ”0.5”以上の値が得られる角度 $\delta = 25^\circ$ を採用した. この場合, センサへの反射光

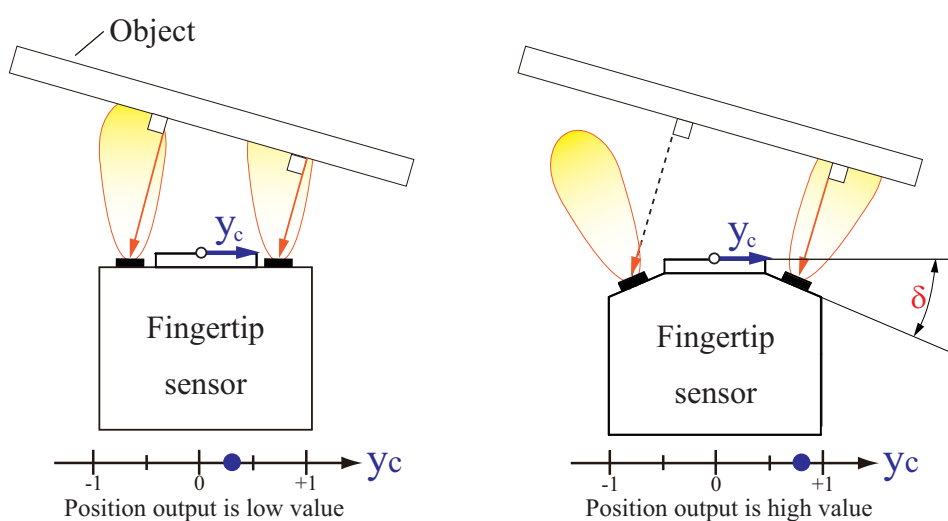


Fig. 3.14 Relationship between an angle δ and position output y_c

Fingertip Proximity sensor

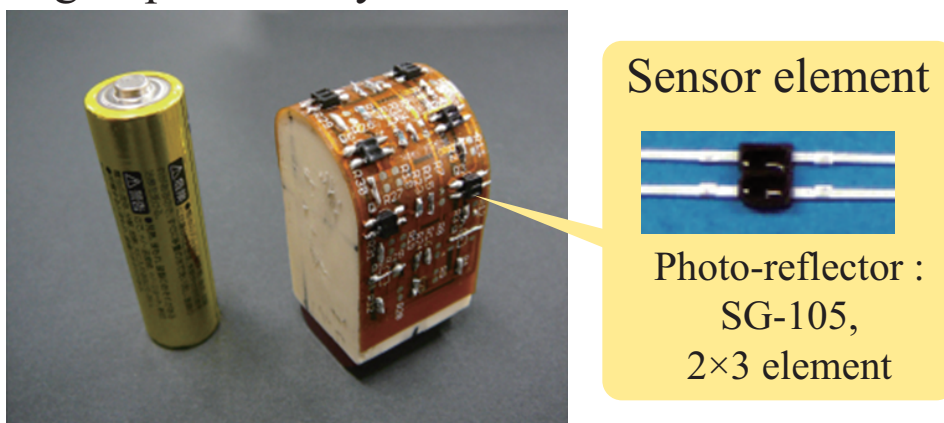


Fig. 3.15 Previous fingertip proximity sensor ^[46]

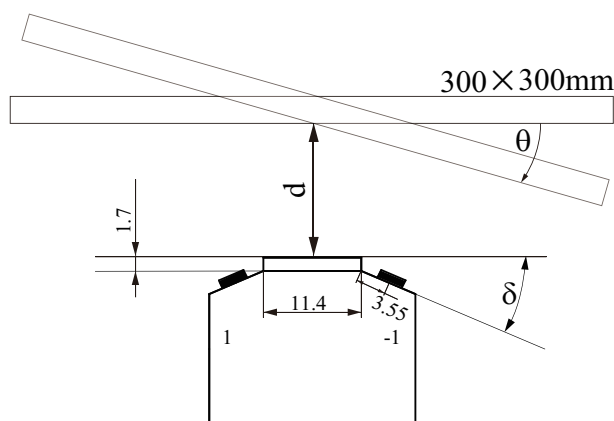


Fig. 3.16 Simulation model used to verify relation between sensor outputs x_c , I_{all} and the angle δ

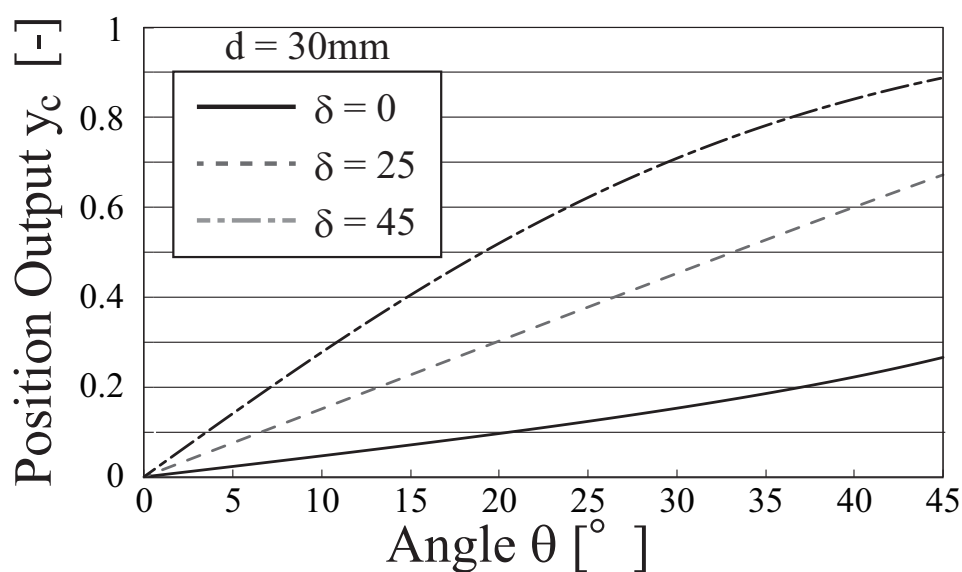


Fig. 3.17 Simulation result of position output x_c (relation with the angle δ)

量の減少により，距離出力 I_{all} は30%程度に低下するが，これは図3.19に示すように素子を2個隣接して配置し並列接続することで，反射光に対する光電流量を増加させ，距離出力 I_{all} の最大値を50%以上の値に保つように工夫した．なお，この並列接続は，距離出力 I_{all} の最大値を増加させる役割の他に，次で説明する照射光強度の分布調整という役割も持っている．

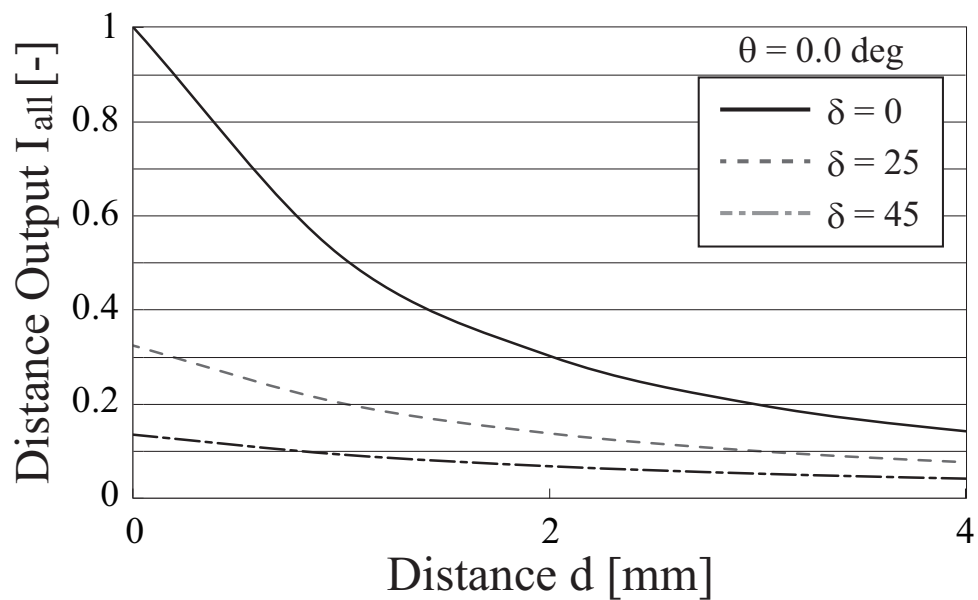


Fig. 3.18 Simulation result of distance output I_{all} (relationship with the angle δ)

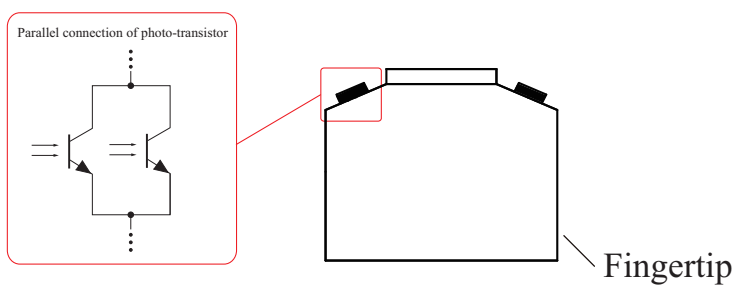


Fig. 3.19 Parallel connection of photo reflectors

2) 距離出力 I_{all} についての検討

次に2)を達成するために、指先の先端から根元にかけてのフォトリフレクタの配置個数と並列接続した素子の間隔について検討した．距離出力は光電流の総量であり，センサ面に入射する反射光強度に比例するため，物体との距離だけでなく，傾き姿勢の影響も受ける．従って，物体との距離が一定であったとしても，この傾きの影響を受けて距離出力は変動してしまう欠点がある．

そこで，この傾きの影響を小さくするため，1)指先端から根元にかけての素子数と，2)並列接続した素子の間隔の2つのパラメータを調整する．この2つのパラメータは，指先の先端から根元にかけての照射光強度分布に関係するため，反射光強度の偏りが小さくなるように配置を行うことで，物体面の傾きによる距離出力の変動の抑制が期待できる．パラメータのうち，配置個数は照射光強度の分布に与える影響は大きく，間隔の影響は小さいことが予想される．そこで，まず配置個数を決定し，次に並列接続した素子の間隔を決定することとした．

図3.20にシミュレーション条件を示す．対象物は指先より十分大きな平面とし，フォトリフレクタ数が2, 3, 4, 5素子のときの角度 ϕ と距離出力の関係を調べた．その結果を図3.21に示す．図の縦軸は距離出力 I_{all} であり，横軸は物体の角度 ϕ である．なお，距離出力 I_{all} は5素子の場合のピーク値で正規化してある．図3.21より，3素子の場合，角度 ϕ の変化による距離出力の変動が小さい．

そして，図3.1(c)に示す通り，並列接続した素子間隔 Ψ_i ($i = 1, 2, 3$)を調整することで，距離出力の変動をさらに小さくすることにした．図3.21によれば，3素子の場合，指腹中心での距離出力は指の先（もしくは根元）よりも高いため，2個ずつ並列配置した3つのフォトリフレクタのペアのうち，指腹中心部の素子間の角度を指先・根元よりも広げることで距離出力の変動を小さくすることを考えた．そこで，図3.1(c)に示すように，指の先端・根元の素子間隔は，素子サイズから決定される最小配置角度 3.2° とし，指腹中心部の素子間の角度 Ψ のみ 3.2° から 10° まで変化させるシミュレーションを行った．なお，対象物と物体角度は図3.20(a)の条件とした．

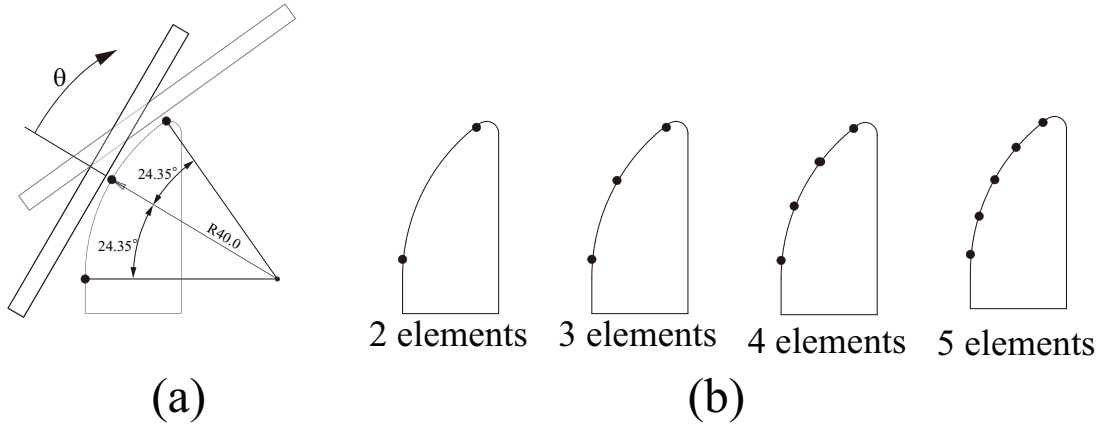


Fig. 3.20 Simulation model used to verify relation between sensor outputs x_c , I_{all} and number of photo-reflectors

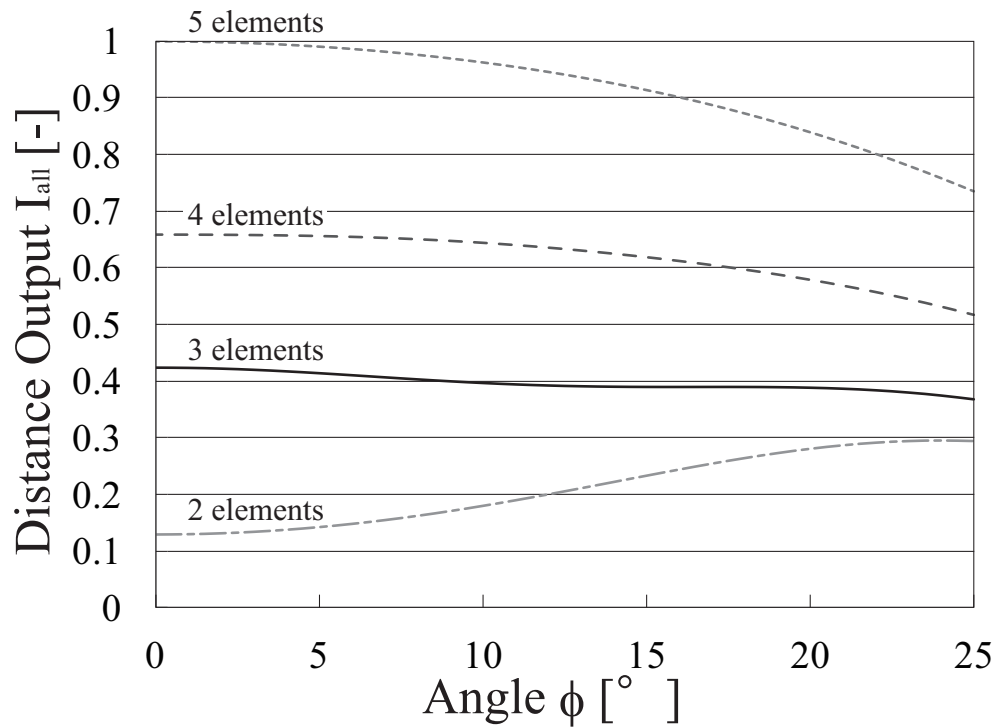


Fig. 3.21 Simulation result of distance output I_{all} (relation with number of photo-reflectors)

この結果を図3.22に示す．同図の縦軸は距離出力 I_{all} の変動係数（標準偏差/平均）であり，横軸が素子間隔 Ψ である．この変動係数が小さいほど，物体との傾き角度 ϕ の変化による I_{all} 変動が小さいことを意味する．そこで，変動係数が最小値をとる $\Psi = 6.5^\circ$ が最適な配置間隔であり，この値を採用した．

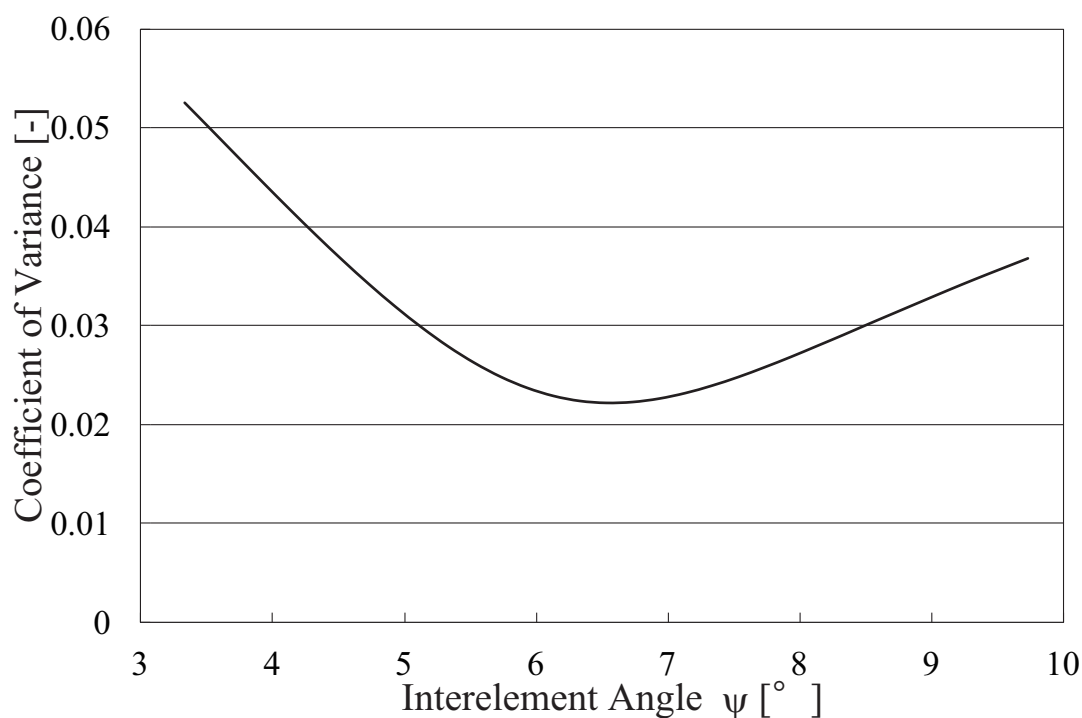


Fig. 3.22 Simulation result of distance output I_{all} coefficient of variance vs. an interelement angle Ψ .

以上の検討より，指先形状と触・近接覚センサの実装領域，および，近接覚センサの素子配置を決定した．この寸法関係に基づき，図3.23(a)に示す検出素子EE-SY1200と抵抗回路網を備えたフレキシブル基板を設計・開発し，これを図3.23(b)に示すように，指先上に張り付けることで3次元的な素子配置を実現した．このフレキシブル基板の回路図を図3.24に，外形・パターン

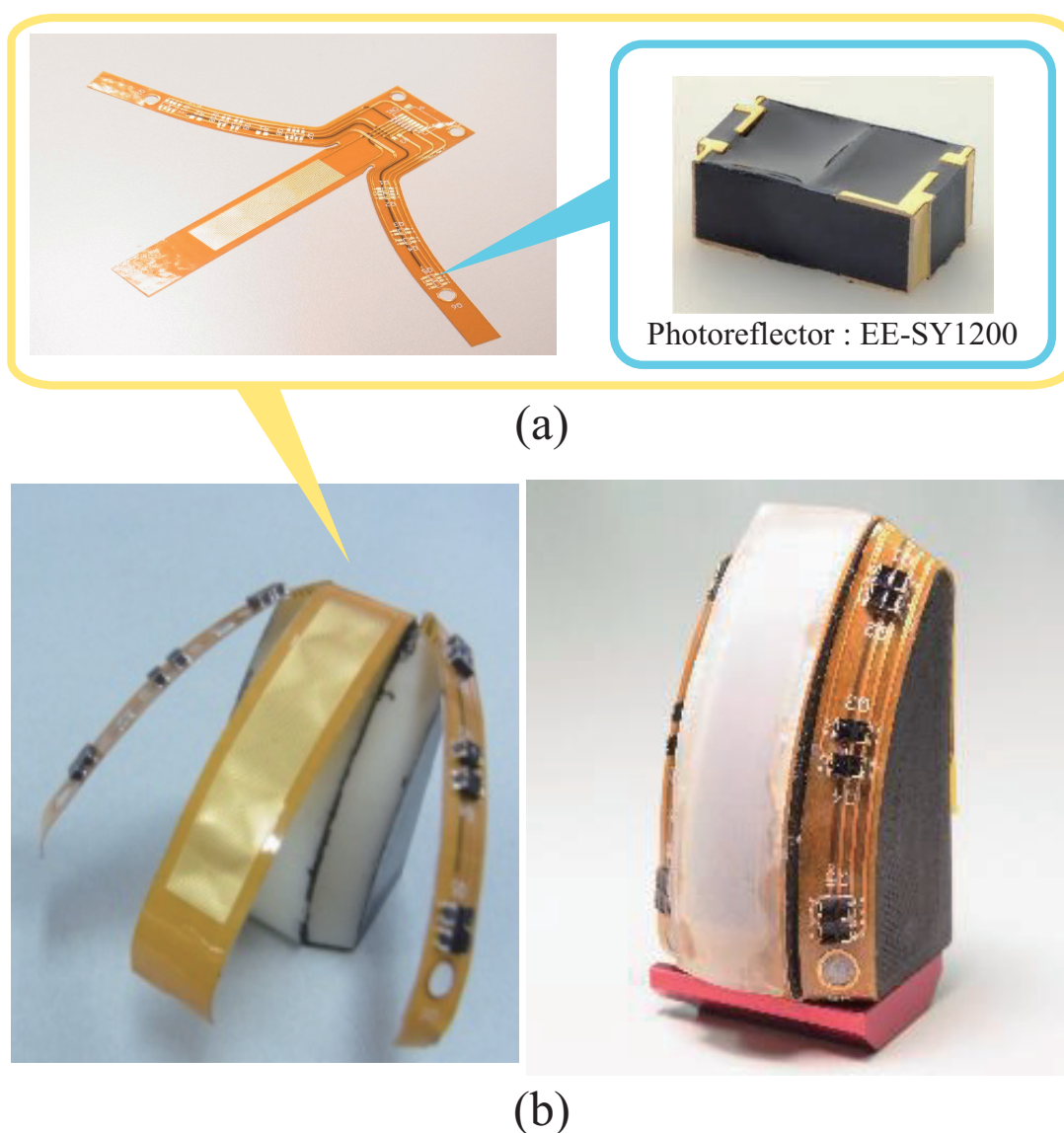


Fig. 3.23 (a) Overview of the sensor sheet (Flexible board) and the photoreflector, (b) Three-dimensional element placement was realized by sticking the sensor sheet on the fingertip

を図3.25に示す. 基板外形は, 指先曲面上に沿って貼り付け可能とするために, 3D CAD(Solid works)で指先モデルを設計し, この各辺, 曲面の長さから決定した. なお, 図3.24では回路図を見やすくするために, 素子EE-SY1200のLEDとフォトランジスタを分離して描いているが, 実際には発光・受光部は1素子にパッケージされている. 同図の赤枠で囲んだ部分がフレキシブ

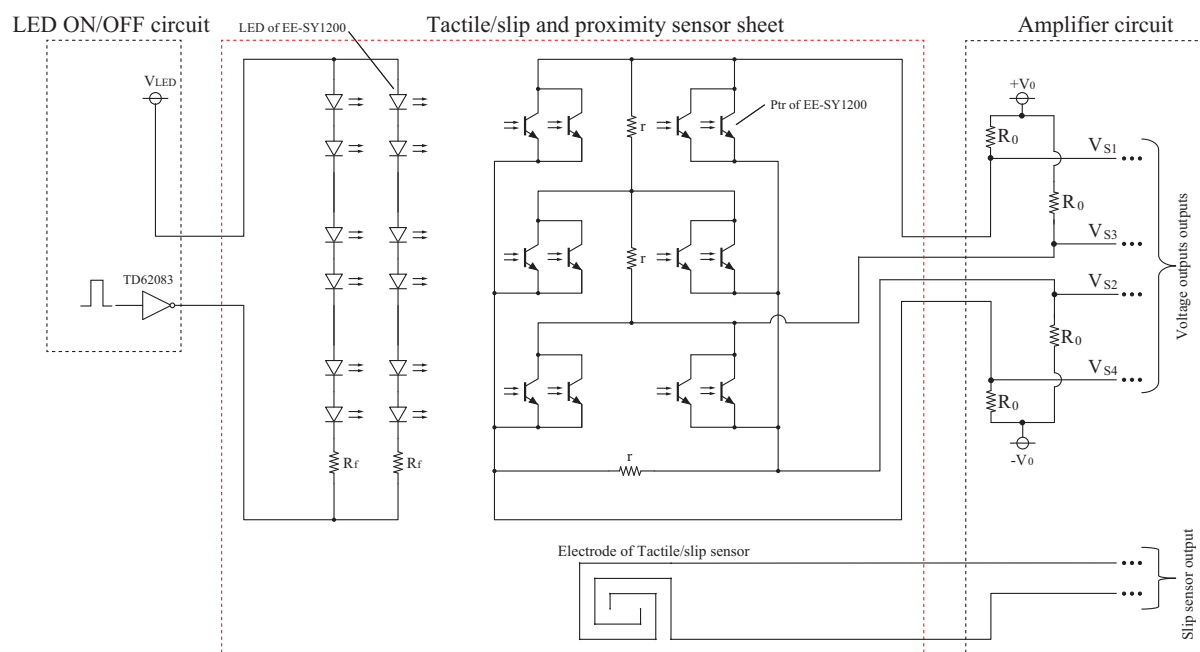


Fig. 3.24 Schematic diagram of the tactile/slip and the proximity sensor sheet

Table 3.3 Supply voltage, current and resistor value of the fingertip proximity sensor

Item	Symbol	Value	Unit
Supply voltage of LED	V_{LED}	9.3	V
LED forward current	I_F	50.0	mA
Resistor of LED current	R_F	21.0	Ω
Supply voltage of the sensor	V_0	± 12.0	V
Inner resistor	r	110.0	Ω
Outer resistor	R_0	220.0	Ω

ル基板上に実装した回路である．センサの電源ケーブルをなくすために，外部抵抗 R_0 はアンプ回路に配置することとした．また，センサLEDは6素子

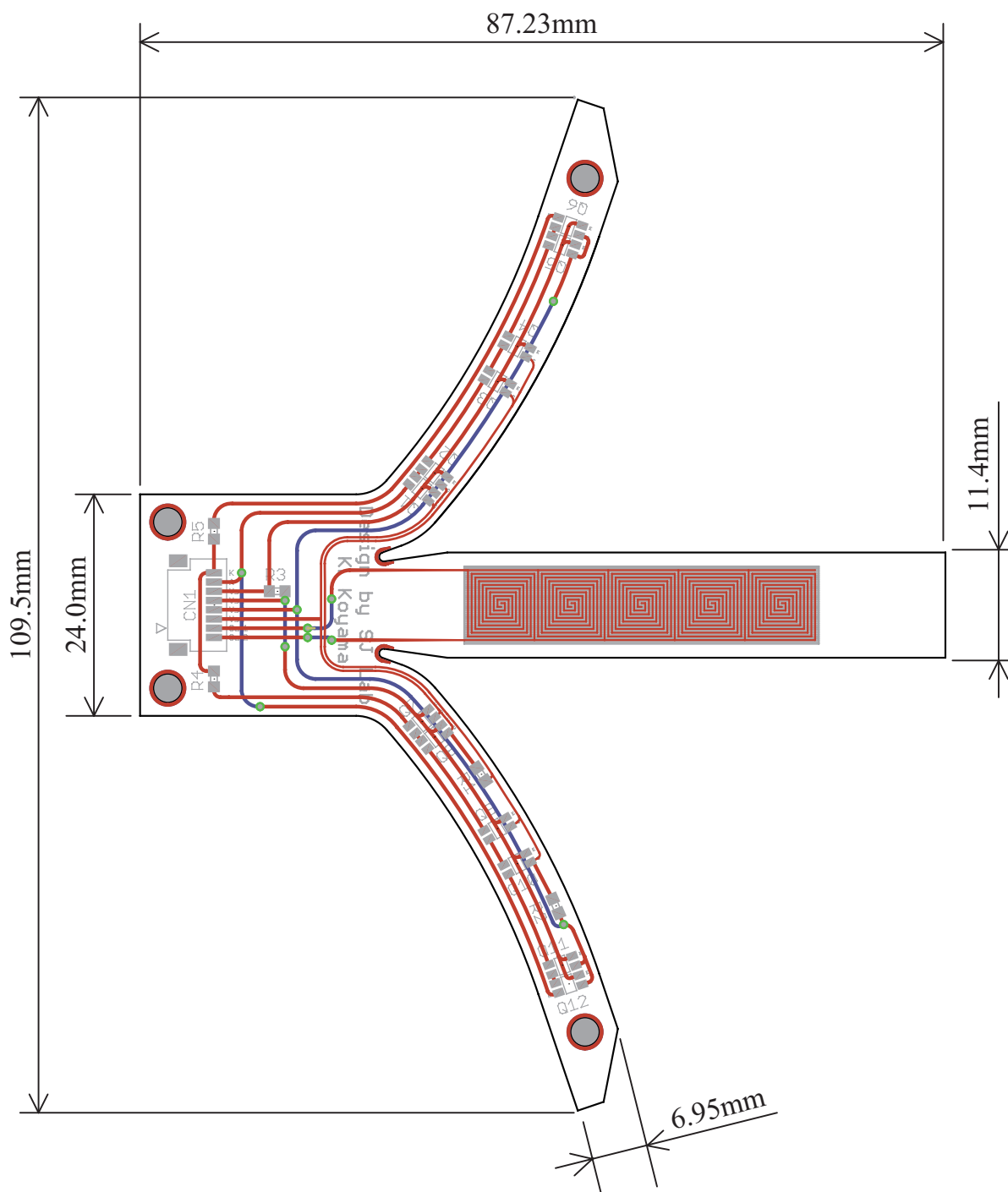


Fig. 3.25 Design drawing of the tactile, slip and the proximity sensor sheet

つつ直列接続し，2つのLED列に流れる電流がなるべく均等となるように，それぞれに制限抵抗を設けた．

使用した抵抗値と電源電圧の詳細を表3.3に示す．将来的に小型のDC-DCコンバータ等でセンサを駆動可能にするために，LED，フォトトランジスタの電源電圧ともに，9.0～12.0V程度の電圧値を目安に設定した．LEDの電源電圧は，各LEDの電流は50.0mAとし，抵抗での電圧降下1.05V($21.0 \times 50.0\text{mA}$)と，6素子での電圧降下7.2V($1.2\text{V} \times 6$)，配線とLEDのON/OFF回路（トランジスタアレイ：TD62083）での電圧降下1.05Vを合計した9.3Vとした．

3.5 まとめ

本章では，ハンドとアームの統合制御を実現するために，新たなハンド指先部の近接覚センサの設計・開発を行った．

まず，ハンドに実装可能な寸法内で大小様々な物体把持が可能となるよう，比較的大きな曲面を持つ指先曲面を設定し，次に触覚センサと近接覚センサを共存させるために，指原中央とその両側で凹凸を持つ指先形状とした．そして，この指先面上に実装可能な小型のフォトリフレクタを選定し，フォトリフレクタの配置角度と間隔を工夫することで，近接覚センサの位置出力と距離出力の欠点を改善した．具体的には，素子実装面に角度 δ を設けることで，位置出力 y_c から物体面の傾きを高感度に検出可能とし，指腹面に沿った素子の配置間隔 ψ_1, ψ_2, ψ_3 を適切に設定することで，姿勢変化による距離出力 I_{all} の変動を小さくする設計を行った．以上の工夫により，物体面と触覚センサ面が接触する距離0mmまで近接覚センサによる距離計測が可能であり，かつ，ハンドとアーム制御の際に，物体面との傾きと距離を同時に検出可能なセンサを構成した．

第4章

指先部近接覚センサによる傾き・距離 検出特性

本章では，新たに開発した近接覚センサの傾き検出特性および，距離検出特性を実験により検証する．以降ではまず，使用した実験装置と対象物を説明し，センサ出力計測の際に用いた回路やセンサ信号処理について述べる．次に，標準反射板に対する傾き・距離検出実験を行い，3章の素子配置設計の効果を検証する．最後に，表面の色，模様，材質，形状が異なる物体に対する傾き・距離検出実験の結果について述べる．

4.1 実験装置と測定条件

実験装置を図4.1に示す．センサは回転ステージ（型番: SGSP-80YAW）に固定されており，対象物は直動Xステージ（型番: GLM10-075-M-EP-C-NN-K-A-N-N）に設置した．同図右の通り，指先のロール角または，ピッチ角周りの姿勢と，物体との距離を調整できる．傾き検出実験では，対象物を一定距離に配置し，ピッチ角または，ロール角を変化させ，位置出力 x_c または， y_c を計測する．一方，距離検出実験では，センサ姿勢を一定とし，物体との距離を変化させた際の距離出力 I_{all} を計測する．

実験で使用した対象物の一覧を表4.1に示す．また，それぞれの対象物の外観を図4.2と4.3, 4.4, 4.5に示す．対象物はセンサより十分大きな白色の標準反射板 (Kodak gray card 90% white) のほか，赤・青・黒画用紙と2種類のイラスト，菓子箱，アルミ板（表面白アルマイト加工），フェルト生地，ガラス板，鏡，3種類の円柱，2種類の半球など，表面の色，模様，材質，形状が様々な物体を用意した．

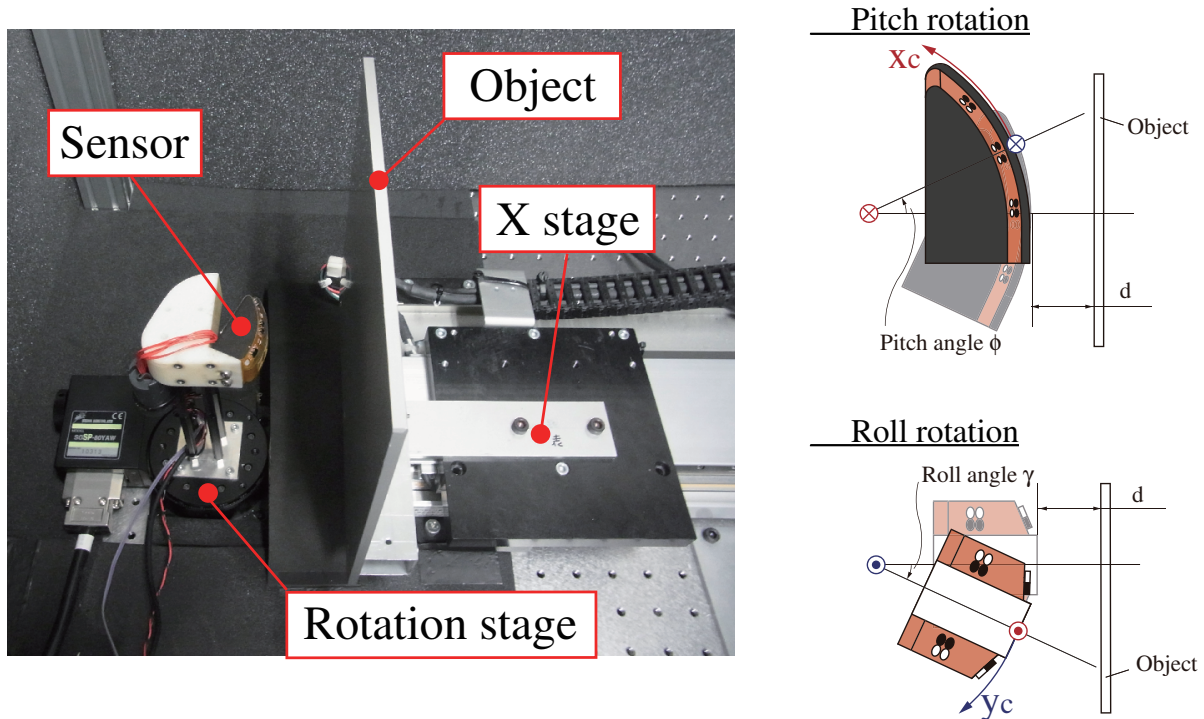


Fig. 4.1 The experimental apparatus used for tilts and distance detection of a surface of an object

センサ出力計測の際，電磁ノイズと外乱光の影響を小さくするために，LEDの点灯制御による発光量増大と，センサ信号の増幅処理，ローパスフィルタリング，背景差分処理を使用した．計測システムの模式図を図4.6に示す．制御器(dSPACE¹)のIOボードにより，センサLEDのON/OFFタイミングを制御し，センサ出力電圧は，プリアンプ回路で演算・増幅した後に，ローパスフィルタ（3次，バターワース特性）で5.0kHz以上のノイズがカットされ，ADボードによりサンプリング周波数10.0kHz($t_{\text{sampling}} = 0.1\text{ms}$)で計測される．そして，ソフトウェア上で，4サンプル平均処理し，センサLEDのON，OFF時の出力の差分をとることで背景差分を計算する．

¹dSPACEの詳細な仕様は5章に記載している

Table 4.1 Names and remarks of objects used in tilts and distance detection experiment

Name	Remarks
Kodak gray card 90% white	-
Red paper	Drawing paper (No gloss)
Blue paper	Drawing paper (No gloss)
Black paper	Drawing paper (No gloss)
Painting 1	-
Painting 2	-
Cookie box	-
Aluminum plate	-
Felt	Color: dark gray
Glass plate	-
Mirror	-
Cylinder $d = 31$ mm	Cork
Cylinder $d = 51$ mm	Cork
Cylinder $d = 78$ mm	Cork
Sphere $\Phi = 50$ mm	Foamed styrol
Sphere $\Phi = 80$ mm	Foamed styrol

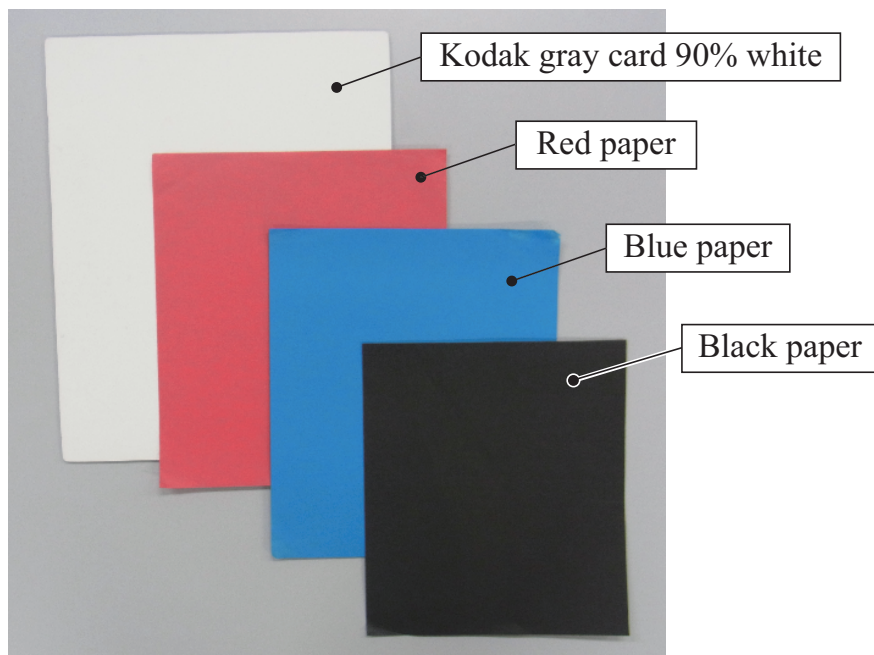


Fig. 4.2 Objects with different colors (from the left, kodak gray card 90% white, red paper, blue paper and black paper)

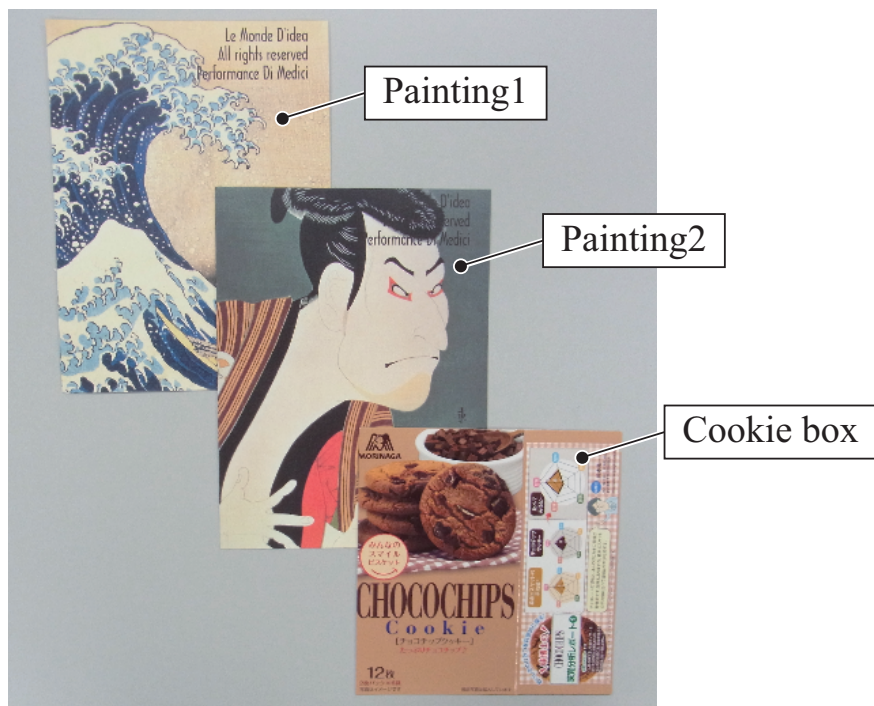


Fig. 4.3 Objects with different pattern (from the left, painting 1, painting 2 and cookie box)

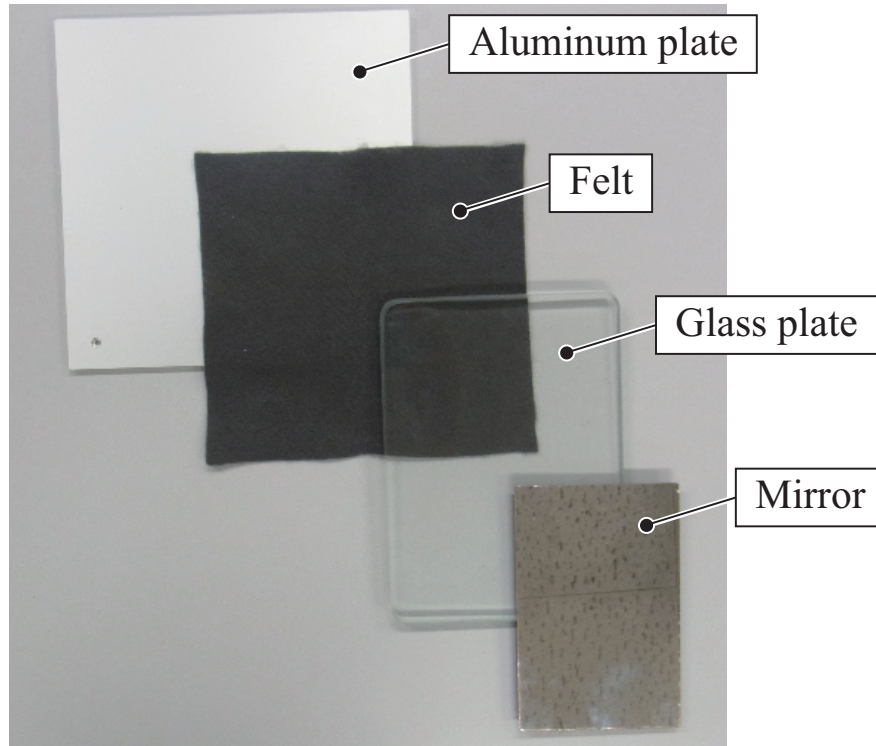


Fig. 4.4 Objects with different materials (from the left, aluminum plate, felt, glass plate and mirror)

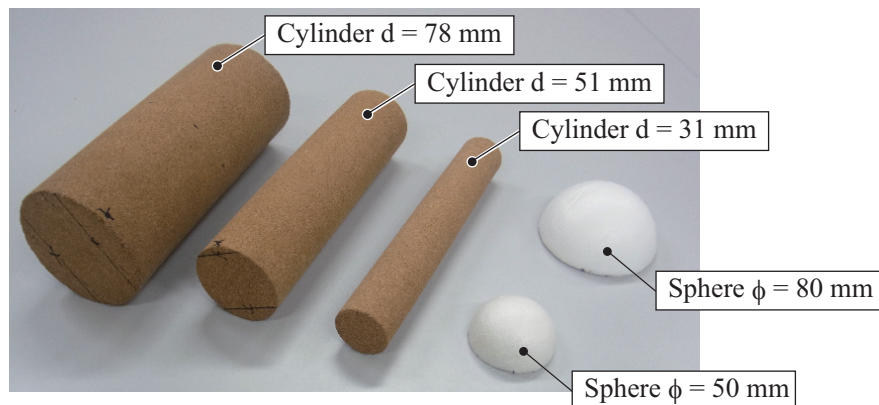


Fig. 4.5 Objects with different shape (from the left, Cylinder $d = 78$ mm, Cylinder $d = 51$ mm, Cylinder $d = 31$ mm, Sphere $\Phi = 50$ mm and Sphere $\Phi = 80$ mm)

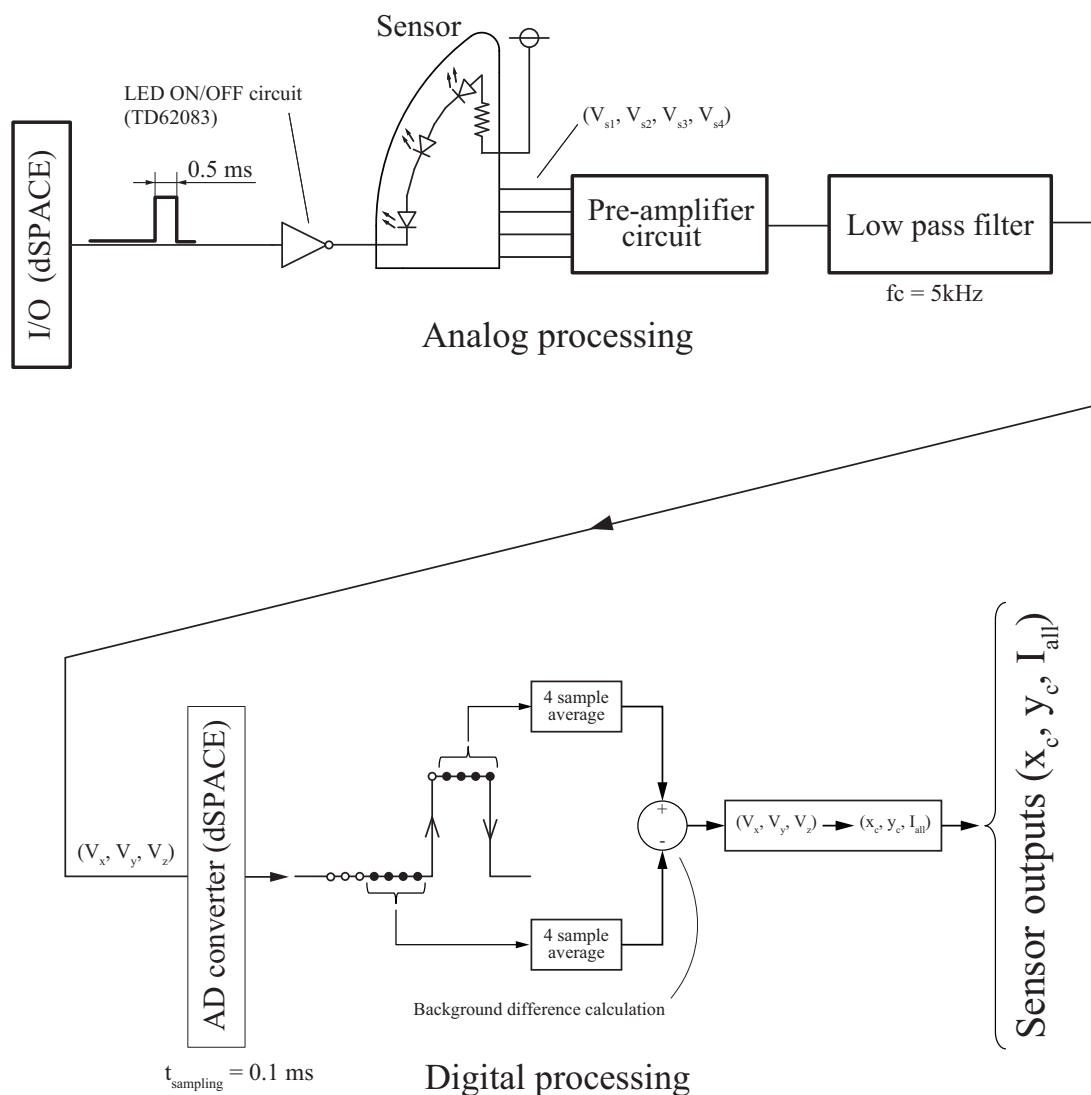


Fig. 4.6 Analog and digital processing of proximity sensor outputs for noise reduction

図4.7に、使用した増幅回路の回路図を示す．この回路では、抵抗回路網の電圧出力 $V_{S1} \sim V_{S4}$ から、計装アンプ（型番: AD622ARZ）により、センサ面 x, y 方向の電流一次モーメントの電圧出力 V_x, V_y を計算する．また、汎用オペアンプ（型番: TL052CD）による加算回路と反転増幅回路により、距離出力の電圧出力 $V_{I_{all}}$ の計算も行う．これらの演算により、 $V_{S1} \sim V_{S4}$ の4つの電圧出力を $V_x, V_y, V_{I_{all}}$ の3つの出力に削減し、同時にAD変換器の最大計測レンジに合わせて信号電圧幅を調整している．増幅回路のゲインを表4.2に、また、電源、抵抗値の詳細を表4.3に示す．なお、センサLED、アンプ回路の電源には、TEXIO社製のシリースレギュレータ方式電源装置（型番: PW18-3AD）を使用した．また、LEDの駆動電流をON/OFFするスイッチング素子はトランジスタアレイ（型番: TD62083）を用いた．

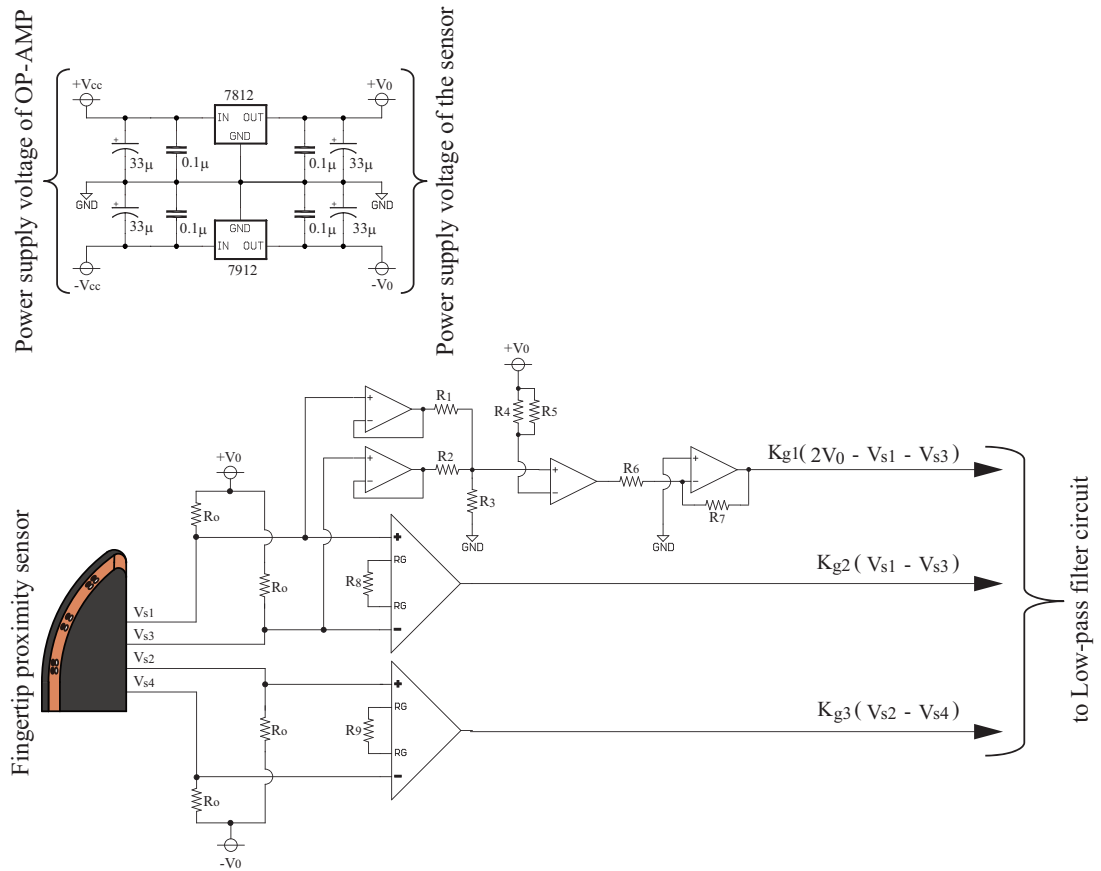


Fig. 4.7 Circuit diagram of the amplifier circuit of voltage outputs $V_{S1}, V_{S2}, V_{S3}, V_{S4}$

Table 4.2 Gains of the amplifier circuit

Name	Schematic symbol	Value	Unit
$V_{I_{all}}$ output gain	K_{g1}	2.0	-
V_x output gain	K_{g2}	7.73	-
V_y output gain	K_{g3}	10.0	-

Table 4.3 Resistor values and supply voltages of the amplifier circuit and the sensor

Name	Schematic symbol	Value	Unit
Sensor supply voltage	V_0	12.0	V
OP-amp supply voltage	V_{cc}	15.0	V
Inner resistor of the sensor	r	110.0	Ω
Outer resistor of the sensor	R_0	220.0	Ω
Resistor of adder circuit	R_1, R_2, R_3, R_4, R_5	10.0k	Ω
Gain resistor 1 of inverting amplifier circuit	R_6	15.0k	Ω
Gain resistor 2 of inverting amplifier circuit	R_7	30.0k	Ω
Gain resistor 1 of instrumentation amplifier (V_x output)	R_8	7.5k	Ω
Gain resistor 2 of instrumentation amplifier (V_y output)	R_9	5.6k	Ω

使用したローパスフィルタの回路図を図4.8に示す. また, その特性を表4.4に, 電源, 抵抗値の詳細を表4.5にそれぞれ示す. 高周波領域での減衰特性を高めるために, 3次多重帰還形ローパスフィルタを採用し, ベッセルフィルタ特性, カットオフ周波数5kHzとした.

フィルタ次数を3としたのは, なるべく小規模の回路でノイズ除去を行うためである. 次数を高く設定するほど, ノイズの減衰率を向上できるが, 必要なオペアンプ数が増え, 回路規模が大きくなる問題がある. 将来的に, ハ

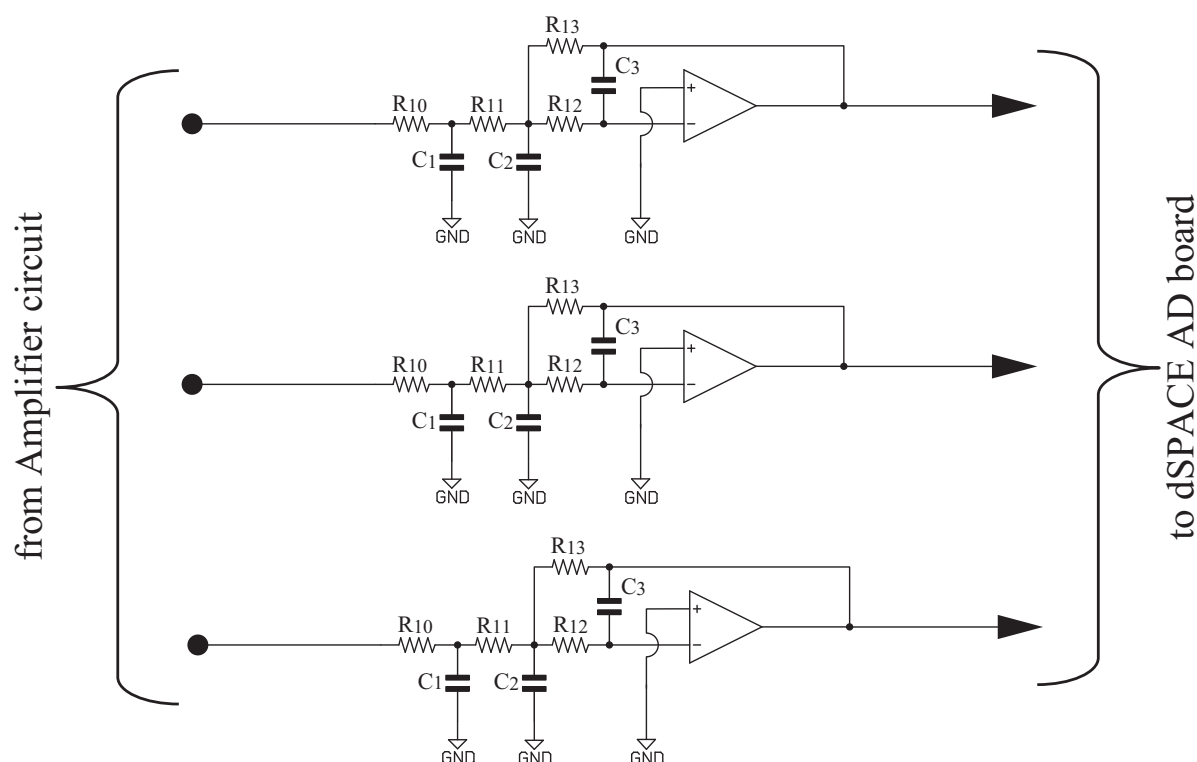


Fig. 4.8 Circuit diagram of the low-pass filter circuit of voltage outputs V_{S1} , V_{S2} , V_{S3} , V_{S4}

Table 4.4 Characteristics of the low-pass filter circuit

Name	Schematic symbol	Value	Unit
Gain	-	-1.0	-
Bessel filter	-	-	-
Cutoff frequency	f_c	5.0k	Hz

ソド掌や指モジュール内部に演算回路を搭載することを考えるとなるべく回路規模は小さいほうが望ましいため，オペアンプ1つと比較的少ない抵抗，コンデンサ数で構成できるものとした．

また，ベッセルフィルタ特性を選定した理由は，過渡応答特性を良くし，信号計測までの待機時間を短くするためである．本研究では，センサLEDをパルス発光制御するため，センサ出力信号はステップ応答状となる．このため，フィルタ回路は，ステップ応答を入力した際に最もオーバーシュートが小さく，出力の整定時間が短いものを用いるべきである．ノイズ減衰率の観点からは，バターワース特性やチェビシェフ特性の方が優れているが，ステップ応答を入力した際の過渡応答特性はベッセルフィルタが最も優れているため，この特性を採用した．

また，dSPACEのAD変換器の最高サンプリング周波数は10kHzであるため，ローパスフィルタのカットオフ周波数は，その半分の値である5kHzとした．

Table 4.5 Resistor values and the supply voltages of the low-pass filter circuit

Name	Schematic symbol	Value	Unit
OP-amp supply voltage	V_{cc2}	15.0	V
Resistor of primary filter	R_{10}	910.0	Ω
Resistor of secondary filter	R_{11}	43.0k	Ω
Resistor 1 of third filter	R_{12}	110.0k	Ω
Resistor 2 of third filter	R_{13}	43.0k	Ω
Capacitor of primary filter	C_1	0.015 u	F
Capacitor of secondary filter	C_2	470.0 p	F
Capacitance of third filter	C_3	68.0 p	F

これらのアンプ回路とフィルタ回路を介して近接覚センサの電圧出力を計測し，式(4.1)～(4.1)を適用することで，センサ出力 x_c, y_c, I_{all} を計算した．

$$I_{all} = -\frac{1}{K_{g1}} \frac{V_{I_{all}}}{R_0}$$

$$x_c = -\frac{1}{K_{g2}} \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{r} \frac{2}{m-1} \right) \frac{V_x}{I_{all}} \quad (4.1)$$

$$y_c = -\frac{1}{K_{g3}} \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{r} \frac{2}{n-1} \right) \frac{V_y}{I_{all}} \quad (4.2)$$

$$(4.3)$$

4.2 標準反射板でのセンサ出力特性

4.2.1 位置出力 x_c, y_c の傾き検出特性

対象物を標準反射板とし，一定距離ごとにピッチ角 ϕ を変化させた際の位置出力 x_c の変化を図4.9・4.10に示す．また同様の条件でロール角 γ を変化させ位置出力 y_c を計測した結果を図4.11・4.12に示す．それぞれのグラフは，横軸がピッチ角 ϕ ，または，ロール角 γ であり，縦軸は位置出力 x_c または， y_c である．また，物体との距離0, 1, 2, 5, 10, 15, 30, 45, 60 mmでの結果を線種を変えてプロットしてある．

位置出力 x_c, y_c ともにセンサ姿勢の正負の角度に依存して $-1 \sim 1$ の範囲で変化している．同一姿勢であっても距離ごとに x_c, y_c の値は変化しているが， 0° においては距離によらず位置出力は“0”に収束する．従って，位置出力 x_c からピッチ角 $\phi = 0^\circ$ を中心とする物体面の傾きを検出可能であり， x_c が“0”となるよう指先姿勢を制御することで，ピッチ角 $\phi = 0^\circ$ に調整できる．また，位置出力 y_c とロール角 γ に関しても同様の出力特性が得られており， y_c が“0”となるよう指先姿勢を制御することで，ロール角 $\theta = 0^\circ$ に調整可能である．

また，位置出力 y_c は距離30 mm以上でも高い値を保っており，ロール角 45° の比較的大きな姿勢誤差が生じている際にもセンサ最大出力の50%以上の値(0.5)を示している．よって，3章のセンサ素子配置設計の目的の特性“1) 物

体と指先間の傾きを表すセンサ出力 (x_c, y_c) は距離数十ミリ程度から感度よく計測できること”を満たしている。

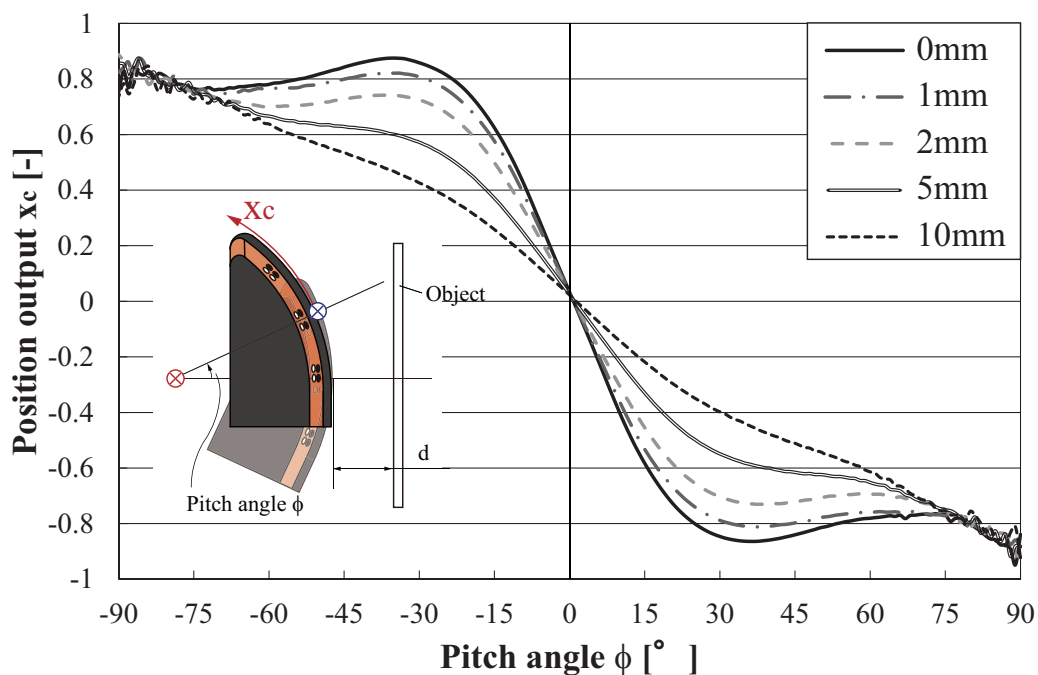


Fig. 4.9 Tilt detection characteristic of position output x_c (object: kodak gray card 90% white, distance $d = 0 \sim 10$ mm)

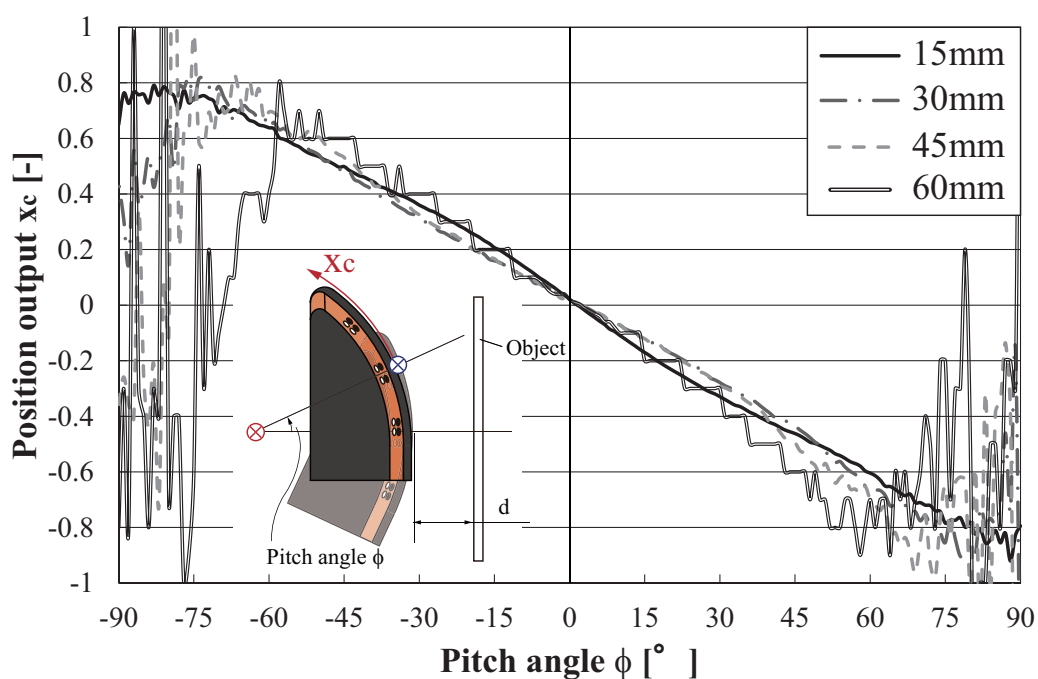


Fig. 4.10 Tilt detection characteristic of position output x_c (object: kodak gray card 90% white, distance $d = 15 \sim 60$ mm)

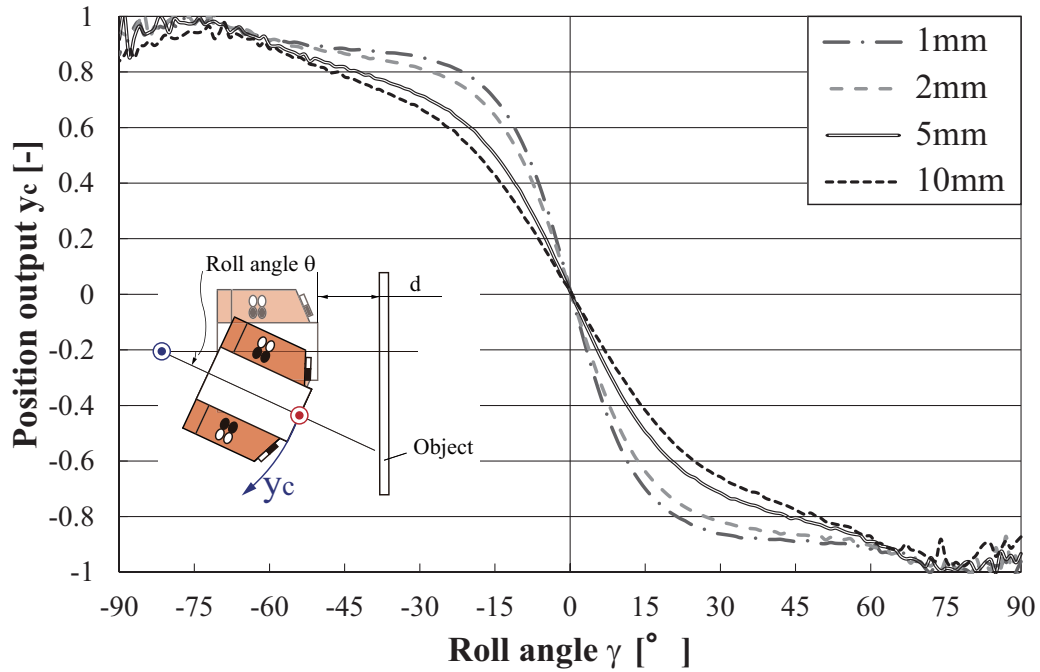


Fig. 4.11 Tilt detection characteristic of position output y_c (object: kodak gray card 90% white, distance $d = 1 \sim 10\text{ mm}$)

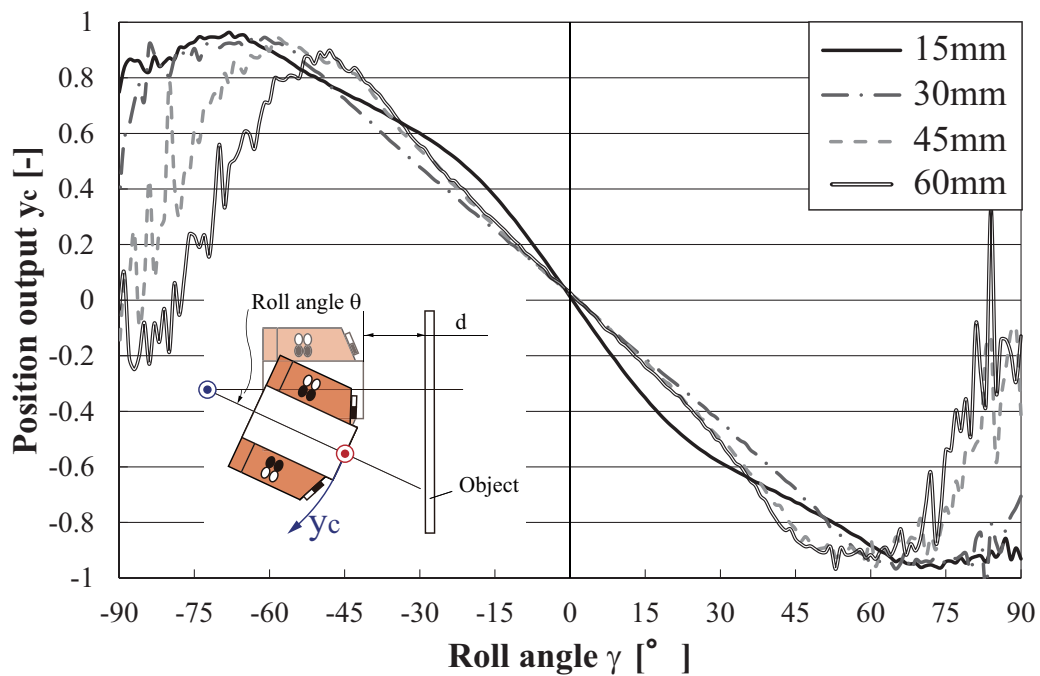


Fig. 4.12 Tilt detection characteristic of position output y_c (object: kodak gray card 90% white, distance $d = 15 \sim 60\text{ mm}$)

4.2.2 距離出力 I_{all} の検出特性

次に，物体との距離を0～50mmまで変化させた際の距離出力 I_{all} の変化を調べた．なお，ロール角 0° ，ピッチ角 0° とし，距離を0.1mm刻みで移動させてセンサ出力を計測した．

実験結果を図4.13に示す．距離出力 I_{all} は距離0mmで最大値をとり，物体との距離が離れるにつれて減少している．従って，ある目標距離での距離出力 I_{all} が既知であれば，距離出力がこの値となるように指先位置を制御することで，物体との距離を一定に調整できる．また，距離出力 I_{all} は距離0mmまで連続的に増加していることから，物体と接触するまで距離のセンシングが可能である．近接覚センサの検出素子であるフォトリフレクタは，焦点距離内で物体の計測が不可となるが，本論文の近接覚センサでは，接触面からオフセットした位置に検出素子を配置したことにより，距離0mmまでセンシングを続けることが可能となった．

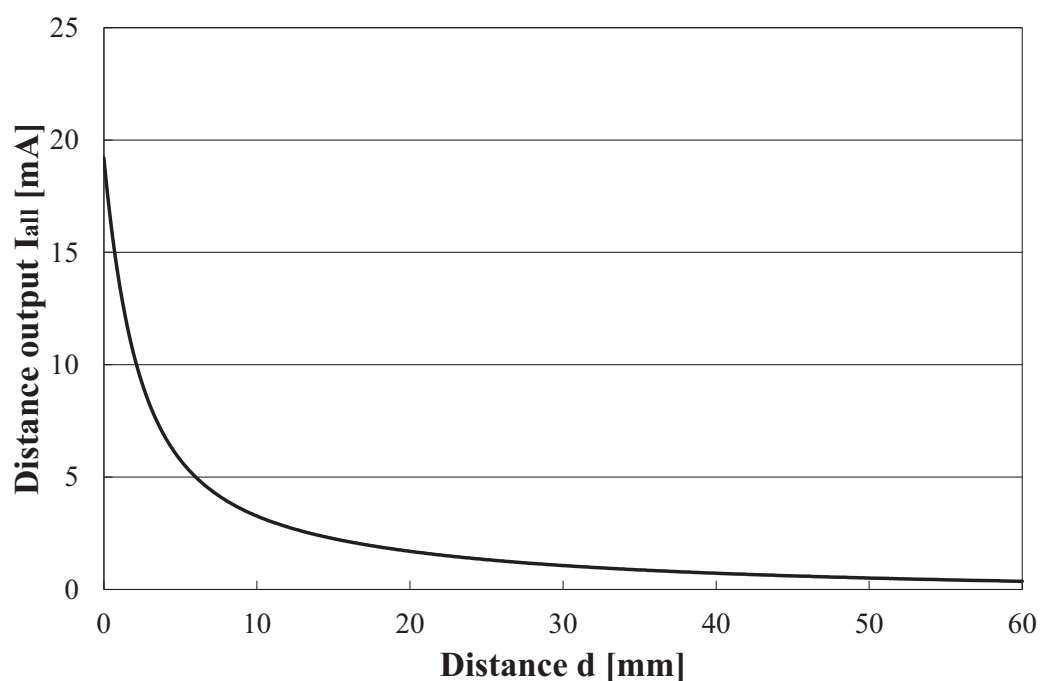


Fig. 4.13 Distance detection characteristic of I_{all} (object: kodak gray card 90% white)

4.2.3 ピッチ角と距離出力 I_{all} の関係

次に、距離一定でピッチ角 ϕ 、またはロール角 γ を変化させた際の距離出力 I_{all} の変化を調べた。実験結果を図4.14~4.17に示す。横軸がピッチ角 ϕ 、またはロール角 γ であり、縦軸はセンサ出力 I_{all} を示している。グラフは、一定距離 d 毎の結果をプロットしてある。同図より、素子配置間隔を調整したピッチ角周りについては $\pm 25.0^\circ$ の範囲で変化しても I_{all} の変動は小さく抑えられている。よって、3章のセンサ設計での目的の特性“2) 物体と指先間の距離計測値 I_{all} は物体と指先の姿勢による影響が少ないこと”を満たしている。また、図4.16より、ロール角 γ が変化した際は距離1mmにおいて3.0mA程度の変動はあるものの、この変動は各距離において比較的小さい。

4.2.4 過渡応答特性

標準反射板との距離を0mmで固定し、センサLEDをターンオン、ターンオフした際の距離出力の電圧出力 $V_{I_{all}}$ の立ち上がり時間を計測した。電圧出力 $V_{I_{all}}$ の計測には、Rohde & Schwarz 社製のデジタルオシロスコープ RTO1014 を用いた。RTO1014の主な仕様を表4.6に示す。なお、計測の際はLEDパルス信号の立ち上がり、または立下りをトリガとして、計測を開始した。

距離出力の電圧出力 $V_{I_{all}}$ の立ち上がり特性を図4.18に、立下り特性を図4.19に示す。 $V_{I_{all}}$ 出力の90%収束時間は $43\mu\text{s}$ であり、また、10%収束時間は $45\mu\text{s}$ であった。以上の実験結果より、出力の立ち上がり、立下り共に1ms以下の高速応答特性を有することを確認した。

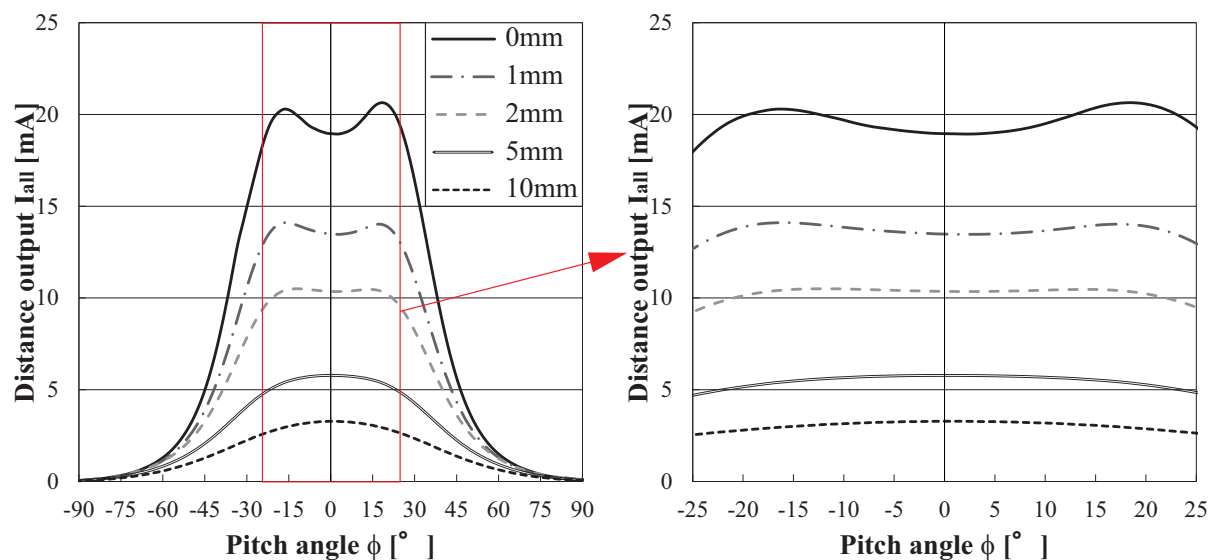


Fig. 4.14 Relationship between pitch angle ϕ and distance output I_{all} (object: kodak gray card 90% white, distance $d = 0 \sim 10$ mm)

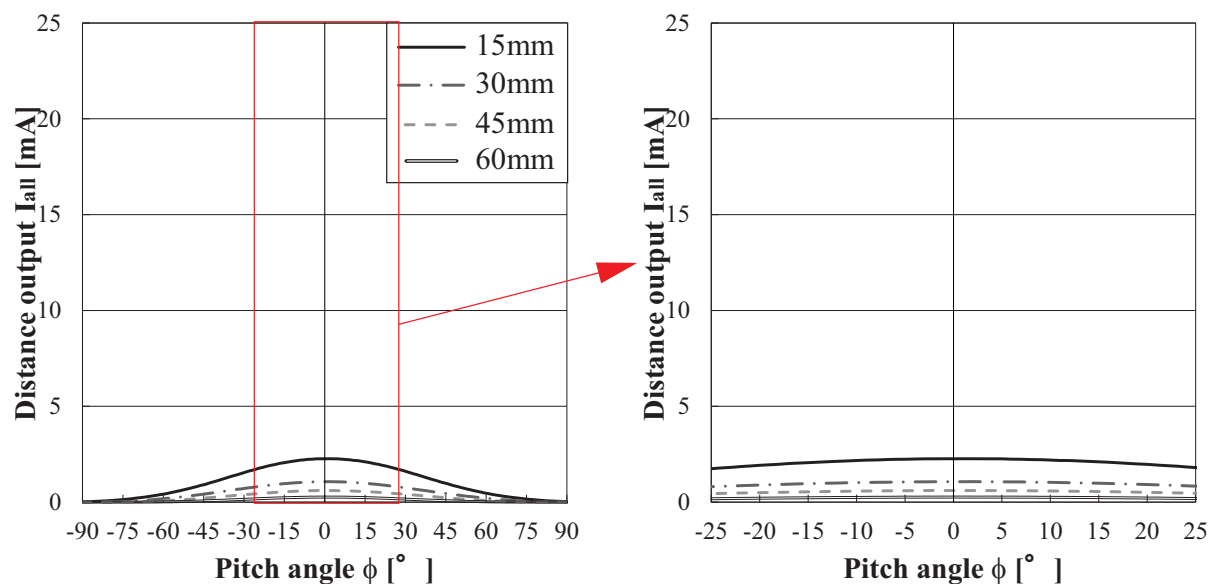


Fig. 4.15 Relationship between pitch angle ϕ and distance output I_{all} (object: kodak gray card 90% white, distance $d = 15 \sim 60$ mm)

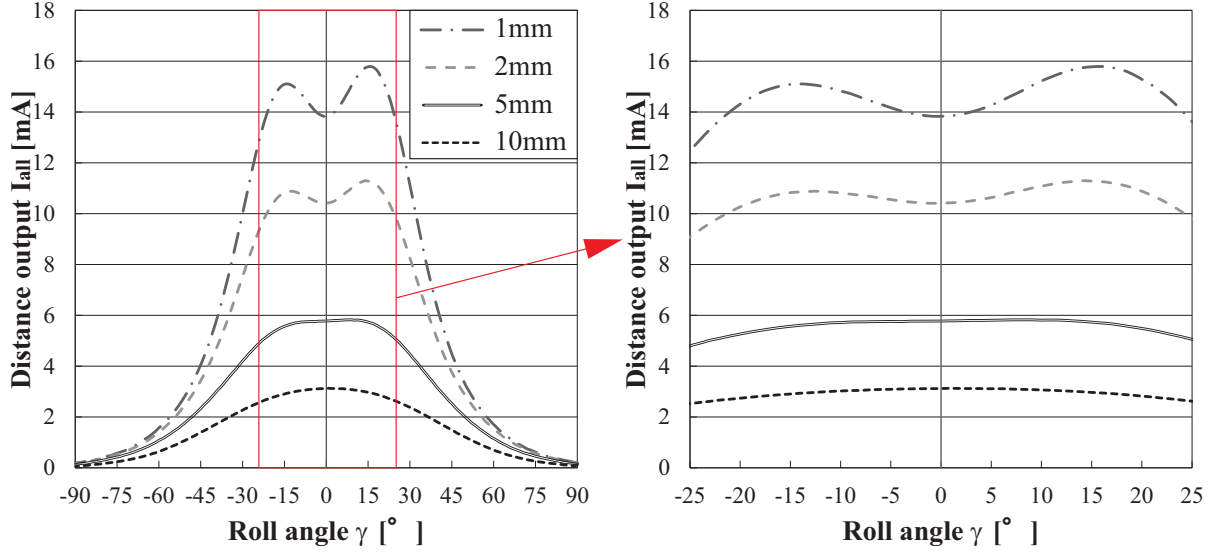


Fig. 4.16 Relationship between roll angle γ and distance output I_{all} (object: kodak gray card 90% white, distance $d = 0 \sim 10$ mm)

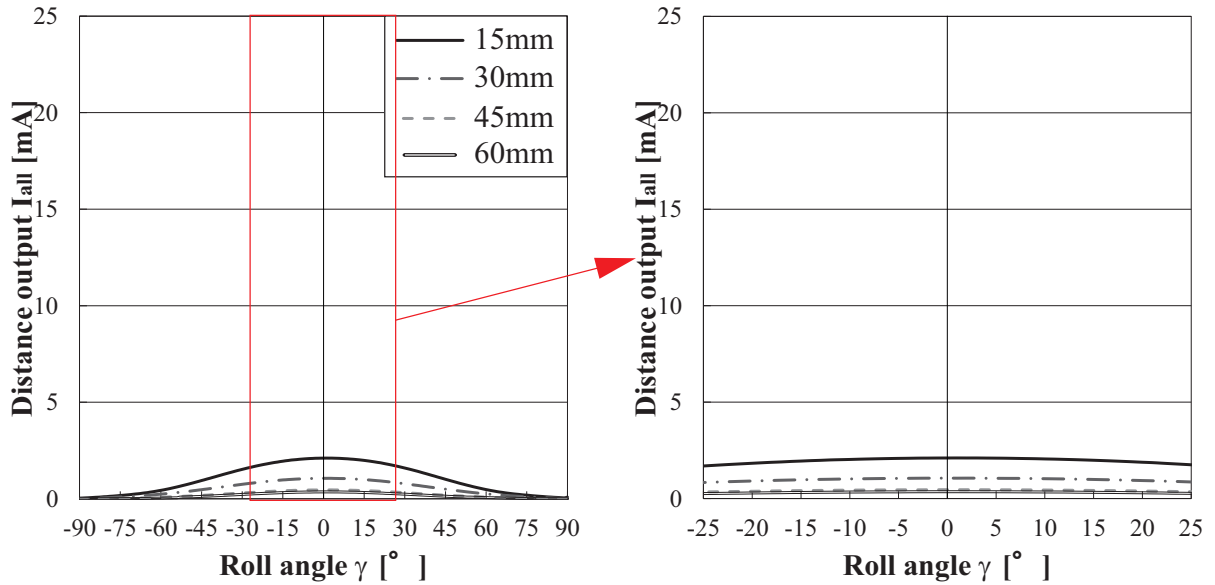
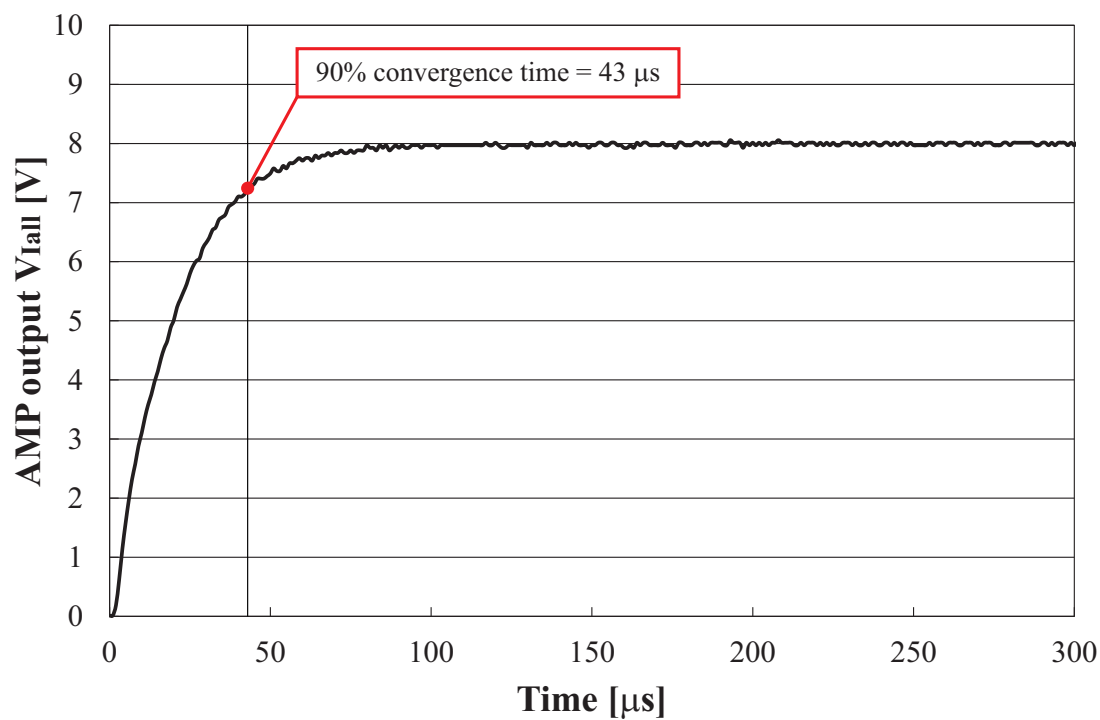
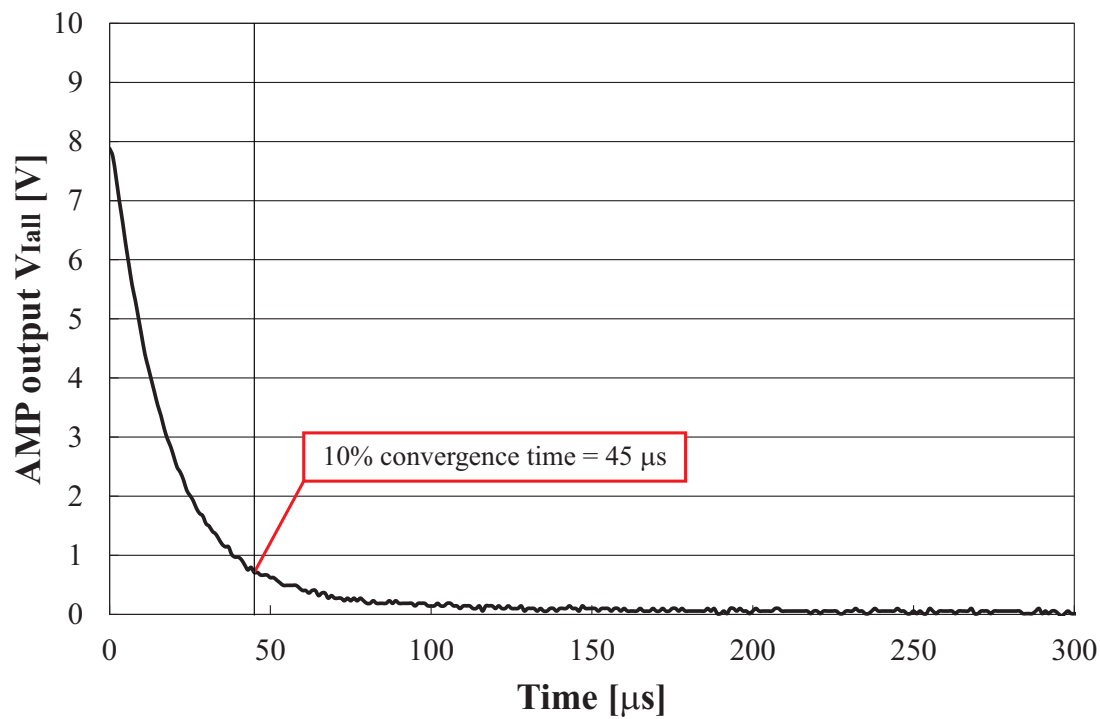


Fig. 4.17 Relationship between roll angle γ and distance output I_{all} (object: kodak gray card 90% white, distance $d = 15 \sim 60$ mm)

Table 4.6 Main specification of digital oscilloscope RTO1014

Vertical axis	
Number of input channels	4
Turn-ON time	300 ps
Capture	
sampling rate	10 Gsample/s
Length of memory	40 Mpoint
Update rate	1, 000, 000 Waveform/s
Horizontal axis	
Time base	50 ps

Fig. 4.18 Turn-ON characteristic of the voltage output V_{Iall} Fig. 4.19 Turn-OFF characteristic of the voltage output V_{Iall}

4.3 物体面の反射特性・形状がセンサ出力に与える影響

4.3.1 位置出力 x_c, y_c の傾き検出特性

対象物面の色，模様，材質による傾き検出特性の変化を図4.20~4.24に示す．それぞれのグラフは，横軸がピッチ角 ϕ ，またはロール角 γ であり，縦軸はセンサ出力 x_c または， y_c を示している．グラフ内には，物体との距離0mmでのそれぞれの対象物の結果を線種を変えてプロットしてあり，傾き検出特性の変化を分かりやすくするため，各グラフに標準反射板での結果を黒色の実

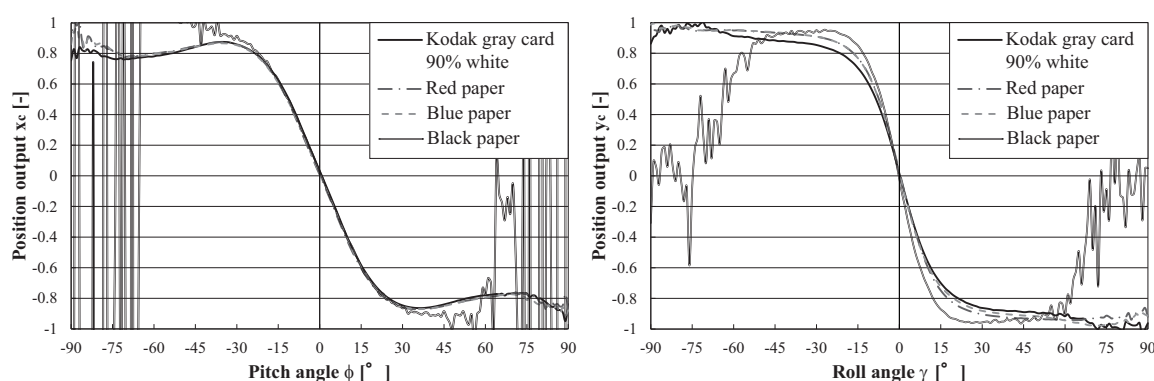


Fig. 4.20 Relationship between object colors and characteristic of position outputs x_c, y_c

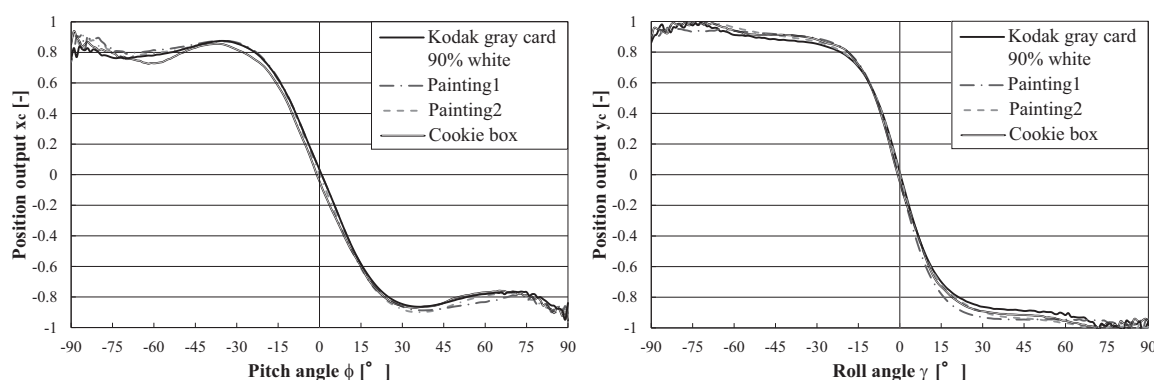


Fig. 4.21 Relationship between object patterns and characteristic of position outputs x_c, y_c

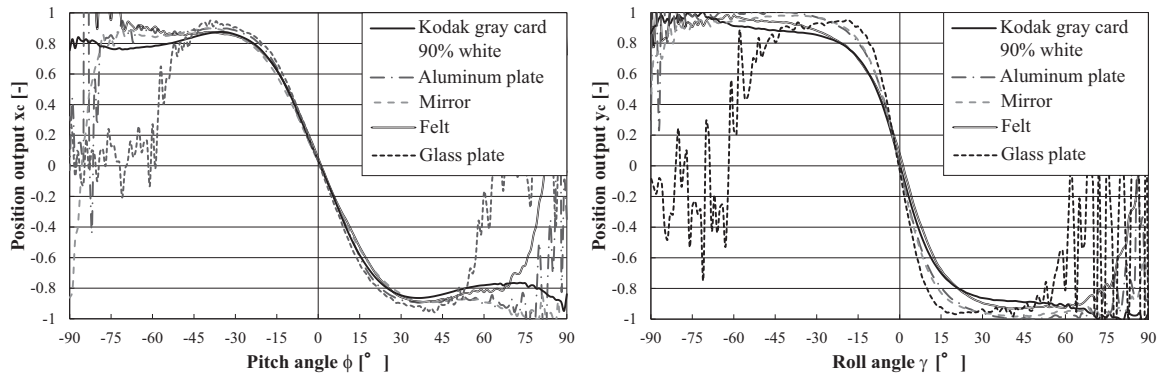


Fig. 4.22 Relationship between object materials and characteristic of position outputs x_c, y_c

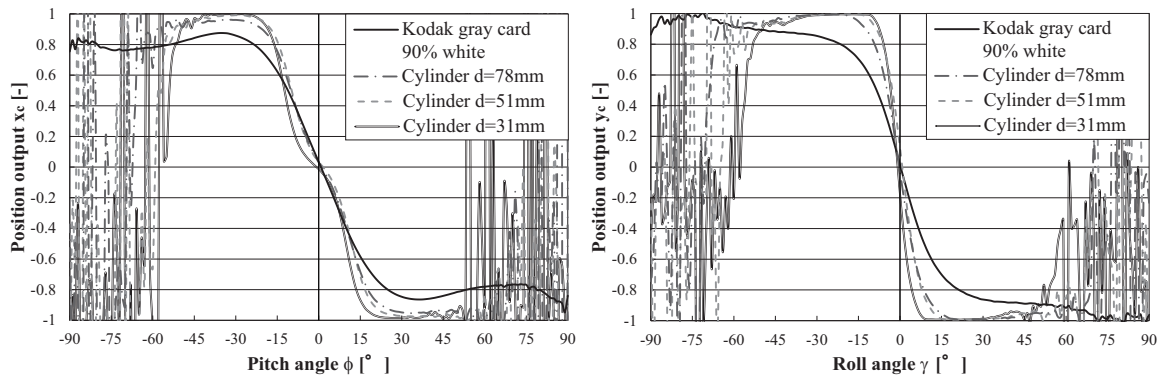


Fig. 4.23 Relationship between object shapes (cylinder) and characteristic of position outputs x_c, y_c

線で示している。

対象物の色・模様を変えた際の実験結果（図4.20～4.21）では，位置出力 x_c, y_c の原点は変化しておらず，また，ピッチ角，ロール角共に $\pm 90.0^\circ$ の比較的広い範囲で，ほぼ同じ曲線で変化している．このため，位置出力 x_c, y_c より，対象物の色や模様によらず，ロバストな傾き検出が可能である．

また，材質を変えた際の実験結果（図4.22）から，ピッチ角，またはロール角 $\pm 45.0^\circ$ の範囲内で，対象物ごとの位置出力特性の変化は小さい．従ってこの角度範囲内で，ロバストに傾き検出が可能である．ただし，ガラス板のように極端に反射光が減少する物体においては，角度 45.0° 以上でノイズの影響

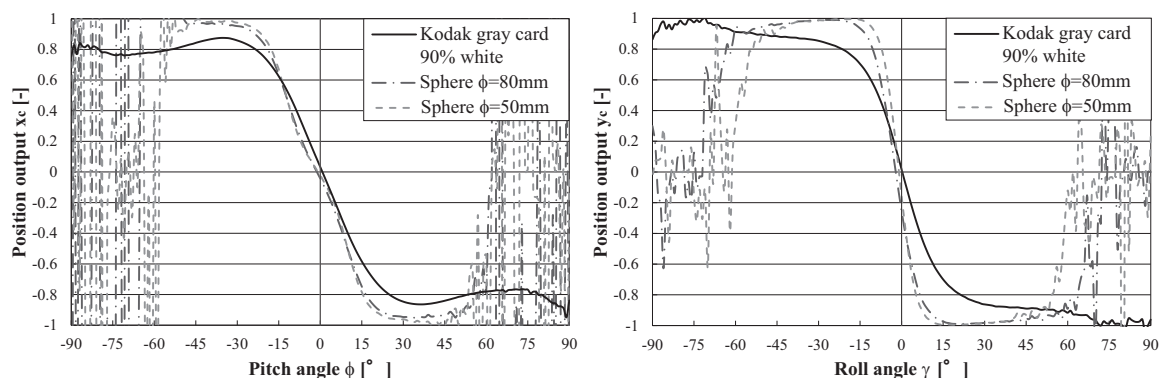


Fig. 4.24 Relationship between object shapes (sphere) and characteristic of position outputs x_c, y_c

響が支配的になるため、 45.0° 以上の傾き検出は困難であると考えられる。

また、形状を変えた際の実験結果（図4.23～4.24）より、円柱や球の半径が変わることで、傾き角度に対し位置出力 x_c, y_c の曲線の形は変化している。ただし、その原点は変化していないことから、円柱や球の直径によらずロバストな傾き検出が可能である。ただし、円柱や球のように曲面を持つ物体の場合、平面物体と比べて反射光強度が減少するため、 45.0° 以上でノイズの影響が支配的になる。このため、 45.0° 以上の傾き検出は困難であると考えられる。

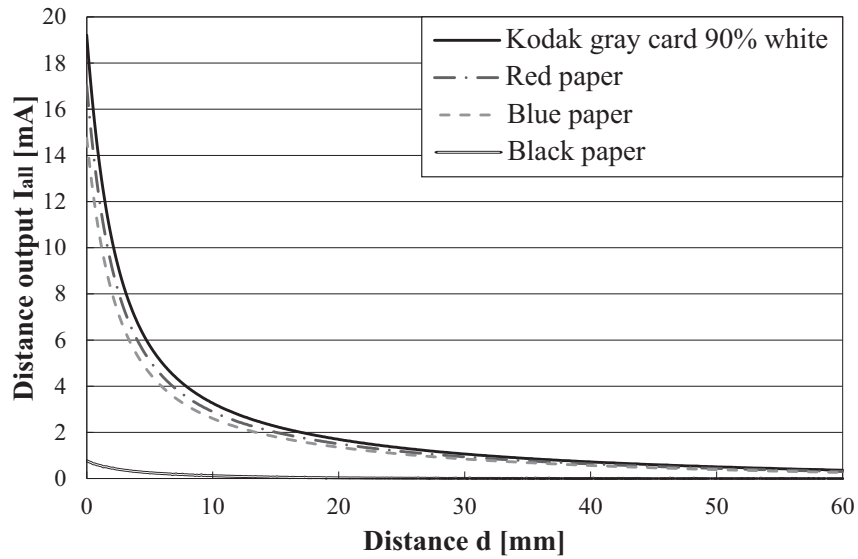
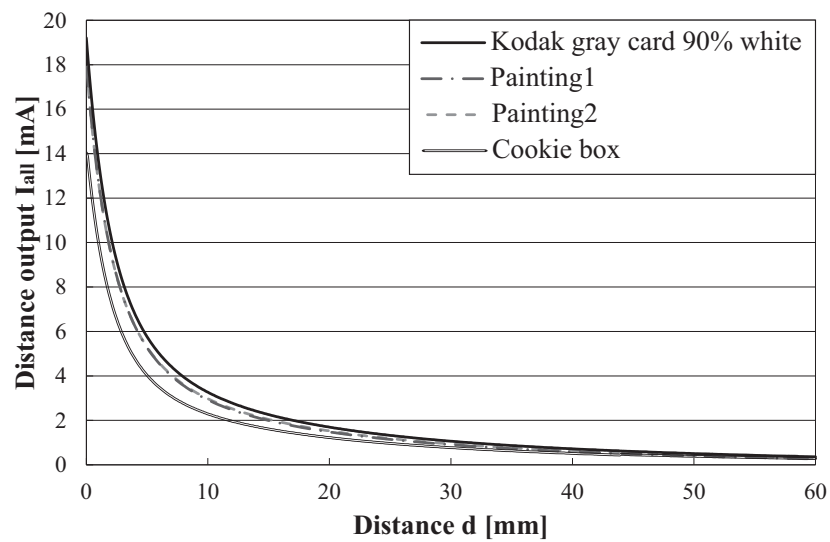
対象物表面の色の影響が小さい要因としては、位置出力を計算する過程での出力の正規化が考えられる。フォトリフレクタ単素子に流れる光電流は物体面の反射率に依存するが、位置出力は各フォトリフレクタに流れる電流を総光電流で除算した値であり、この除算により反射率の影響が除去されていると考えられる。

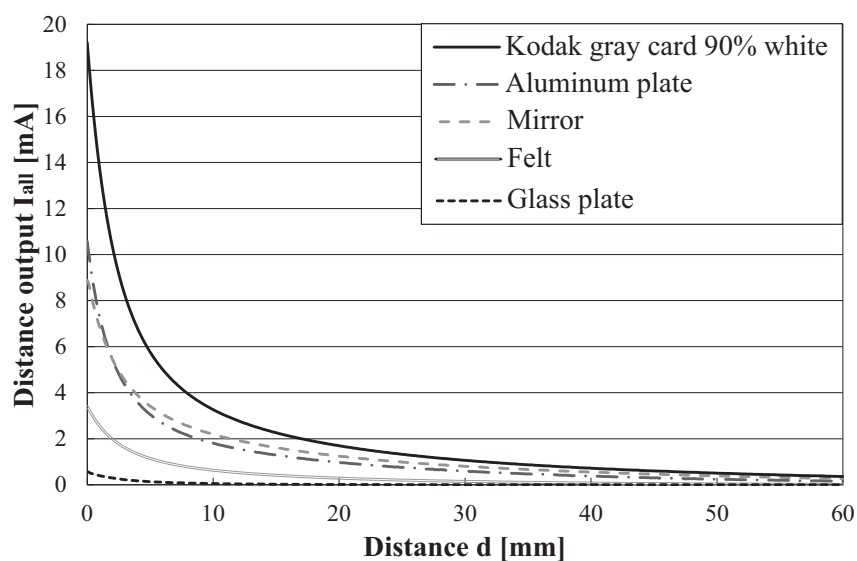
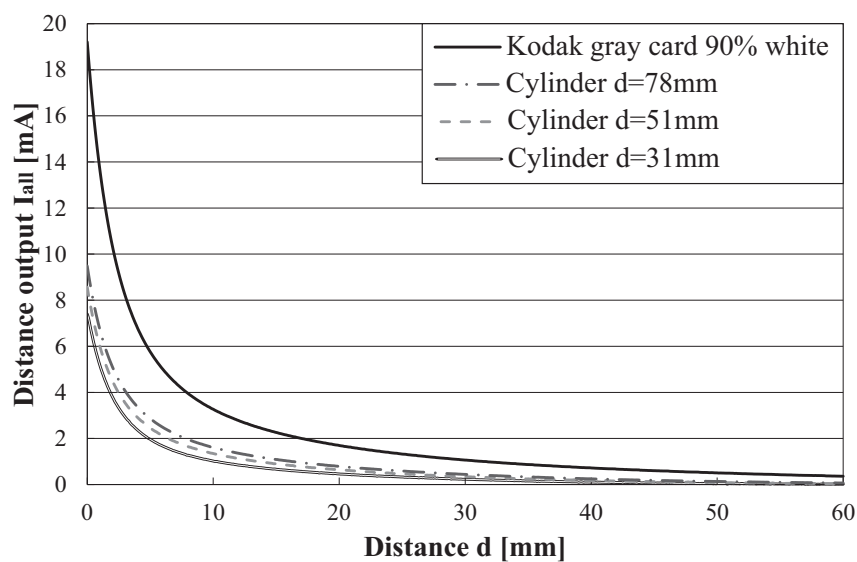
また、模様や材質の影響を受けづらい要因としては、広指向性のフォトリフレクタを用いている点が挙げられる。一般的な光学式センサは、一点の距離を正確に測定するために、狭指向性の検出素子を用い、1素子ずつスキャンすることで傾きや距離を計測する。しかしながら、模様のある物体面や鏡面反射成分が強い面の場合、姿勢により受光強度が極端に変化するため、検出が困難となる。一方、本論文の近接覚センサは広指向性の検出素

子を多数配置しており、さらに全LEDを同時に発光させるため、広範囲に光が照射され、また受光される。従って、センサ姿勢が様々に変化してもいずれかの素子で反射光を捉えることができ、これが鏡面反射の検出を可能にしていると考えられる。また、広範囲の反射光が1素子ごとの光電流に変換されるため、細かい模様情報が失われ、無地の平面として検出されていると考えられる。

4.3.2 距離出力 I_{all} の検出特性

色、模様、材質の変化による距離出力 I_{all} の特性変化を図4.25~4.27に示す。また、図4.28~4.29に円柱、球での特性変化を示す。それぞれのグラフは横軸が物体との距離 d 、縦軸が距離出力 I_{all} である。なお、ピッチ、ロール角は $(\phi, \theta) = (0, 0)$ の一定姿勢であり、距離 d を0.1mmずつ60mmまで変化させた際の各物体での I_{all} を線種を変えてプロットしてある。また、各グラフには比較のために標準反射板の結果も示している。各物体において距離出力 I_{all} は距離 $d = 0\text{mm}$ で最大値をとり、距離の増大に伴って減少している。その最大値は対象物ごとに異なり、物体ごとの光の反射率の影響を受けている。従って、把持対象物面の光の反射率が未知の場合、この影響を補正する手法が別途必要である。物体表面の光の反射率の推定やセンサ補正手法は7章で述べる。

Fig. 4.25 Relationship between object colors and characteristic of distance output I_{all} Fig. 4.26 Relationship between object patterns and characteristic of distance output I_{all}

Fig. 4.27 Relationship between object materials and characteristic of distance output I_{all} Fig. 4.28 Relationship between object shapes (cylinder) and characteristic of distance output I_{all}

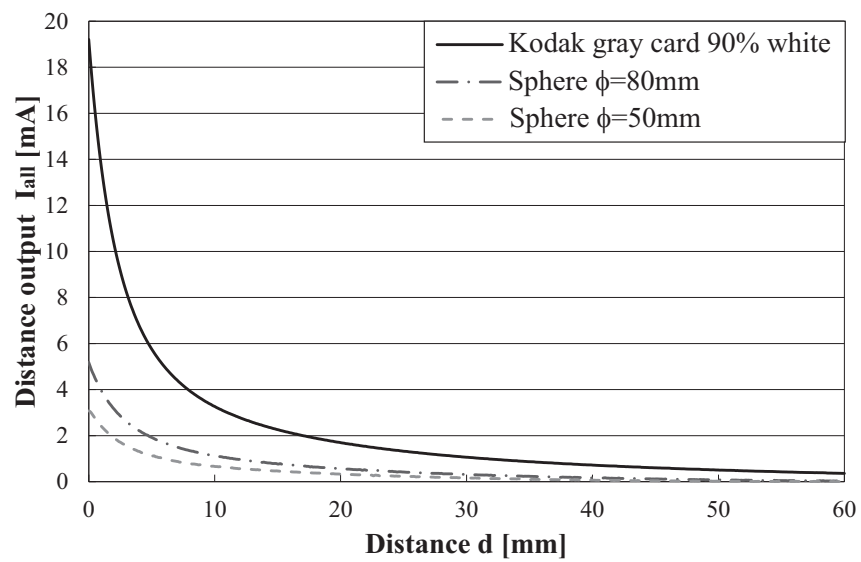


Fig. 4.29 Relationship between object shapes (sphere) and characteristic of distance output I_{all}

4.4 まとめ

本章では，新たに開発した指先部の近接覚センサによる物体面の傾き・距離検出特性を実験で検証した．

物体と指先面が正対している際は，位置出力 $x_c, y_c = (0, 0)$ に収束することから，距離によらず，物体面との傾き角度 0° を基準とする傾き検出が可能である．また，距離 30 mm 程度においても，位置出力 y_c は最大値の 50% 以上の値を保っており，実装面角度 δ による傾き検出感度の改善を確認した．さらに，ピッチ角を $\pm 25.0^\circ$ の範囲で変化させても距離出力 I_{all} の変化は小さく抑えられており，配置間隔 ψ_1, ψ_2, ψ_3 の調節の効果を確認した．

次に，赤・青・黒画用紙，模様異なるイラスト，アルミ板，フェルト生地，ガラス板，鏡，球などの様々な対象物を用いて，傾き・距離検出実験を行った結果から，位置出力 x_c, y_c は物体の色，模様，材質，形状によらずロバストに傾き検出が可能なことを確認した．位置出力 x_c, y_c はセンサに生じる光電流一次モーメントを総光電流量で除算することで正規化してあるため，この計算の過程で反射率の影響が除去されていると考えられる．また，本論文のセンサは広指向性の素子を用いており，広範囲に光を照射・受光するため，物体の局所的な色や模様の情報が失われ，面の傾きの影響が支配的になり，物体面の光の反射率によらず傾き検出が可能になったと考えられる．

だが一方で，距離出力 I_{all} は物体面からの反射光強度に依存するため，物体ごとの影響を受けてそのピーク値は変化する欠点がある．従って，近接覚センサの距離出力に基づき，各指と物体との距離を制御する場合，物体表面の光の反射率を既知として制御目標値を設定するか，反射率の影響を補正する手法が必要である．反射率の影響を補正する手法については，7章で述べる．

第5章

ハンド・アーム統合制御システム

本章では，近接覚センサの出力を基に，ハンドとアームを高速に制御するための統合制御システムについて述べる．

従来，当研究室では，ハンドとアームでそれぞれ個別の制御器^[44]を用いていた¹が，2つの制御器間の通信の問題があり，ハンドとアームを同期して制御することが困難であった．そこで，本論文では1台の制御器により，ハンドとアームを統合的に制御するためのシステムを新たに構築した．

システムの全体の構成を図5.1，外観を図5.2に示す．ハードウェアは，ハーモニックドライブ社製の3指8自由度のロボットハンドを7自由度の汎用ロボットアームPA10-7C（三菱重工製）の先端に取付けた構成である．ハンドとアームのモータドライバとセンサ入出力回路は，一台の制御器（dSPACE, PX20）に接続してある．プログラム開発は，WindowsPC上でMatlab/Simulinkを使用し，コンパイルしたプログラムをdSPACEにダウンロードして実行する．dSPACEでは，内蔵プロセッサにより，0.1ms周期でのセンサ値のサンプリングと，5.0ms周期でのハンド・アームのリアルタイム制御を行う．また，WindowsPCはプログラムの作成のほか，非リアルタイムでのセンサ値，変数の監視の役割を担っている．

以降では，各ハードウェアのスペックの詳細とセンサLEDの点灯・消灯制御，および，ハンドとアームの制御プログラムについて述べる．

¹ハンドはdSPACE(使用OS: Windows XP)，PA10アームはArt-Linuxで制御していた

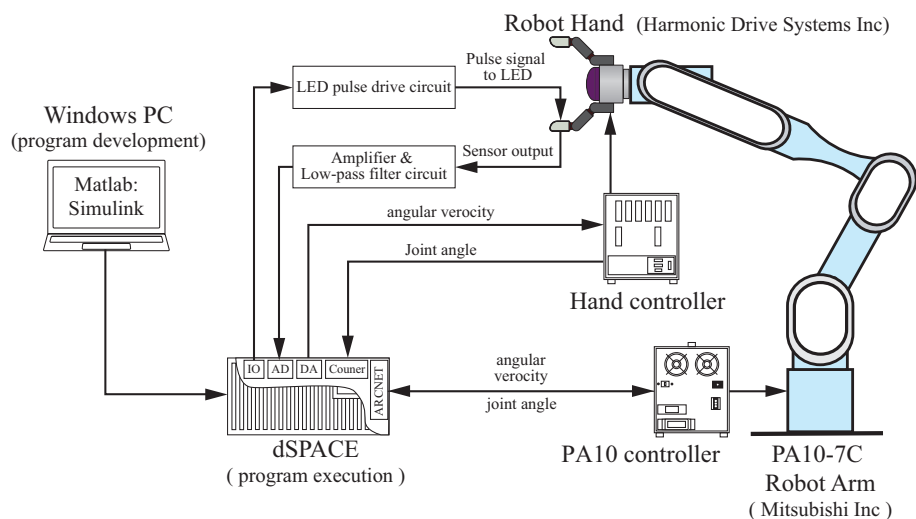


Fig. 5.1 Connection diagram of hardware of robot hand and arm system

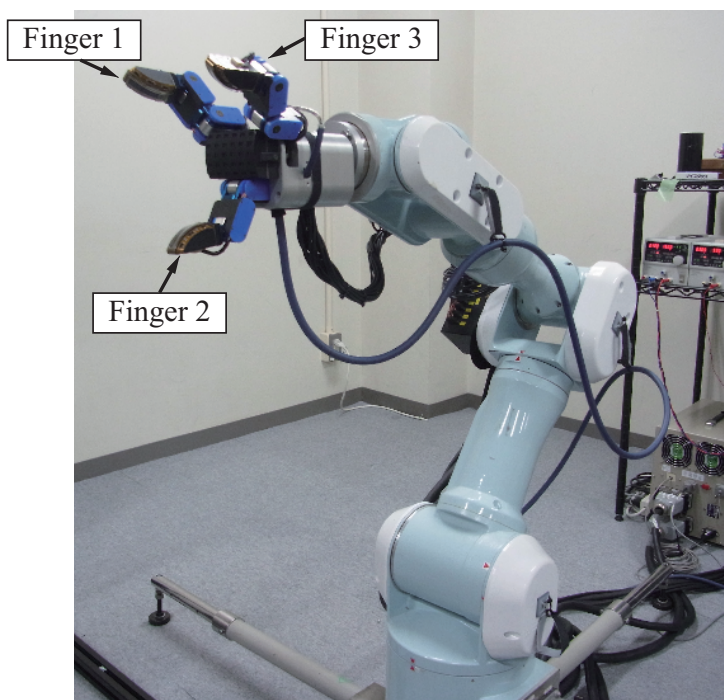


Fig. 5.2 Over view of robot hand(Harmonic Drive Inc.) and arm(PA10-7C, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

5.1 多指ロボットハンド

本論文では各関節にモータと減速機を搭載した多自由度ハンドを用いた．図5.3に外観と関節配置を示す．同図より，3指のうち，第一指と第三指は，屈曲関節 θ_1 , θ_2 と旋回関節 θ_p の合計3自由度であり，第2指のみ屈曲関節の2自由度であるため，ハンド全体で合計8自由度を持つ．このハンドはハーモニックドライブ社製の特注品であり，各関節は小型のACモータとエンコーダ，および，ハーモニックドライブ減速機で構成され，バックラッシュが小さく抑えられている．人間の手においては，図5.4に示すように，関節と関節の間を「指節」と呼び，指先から順に末節(distal phalanx)，中節(middle phalanx)，基節(proximal phalanx)と呼ぶ．また関節は指先から順に遠位指節間関節(distal interphalangeal joint : DIP 関節)，近位指節間関節(proximal interphalangeal joint : PIP 関節)，中手指節間関節(metacarpophalangeal joint : MP 関節)と呼ぶ．本論文では，PIP 関節を屈曲関節1(θ_1)，DIP 関節を屈曲関節2(θ_2)と呼び，基部の回転関節を旋回関節 θ_p と呼ぶ．また各関節の駆動方向と各関節番号を図5.5に示す．

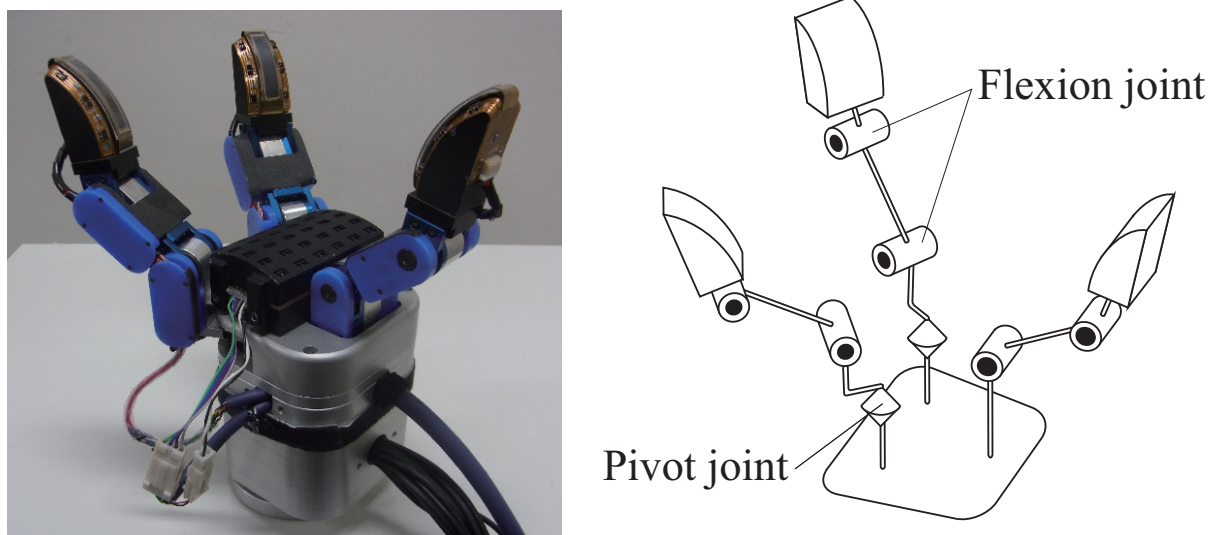


Fig. 5.3 (Right) Overview of robot hand, (Left) Joint configuration of the hand (3-finger, 8D.O.F)

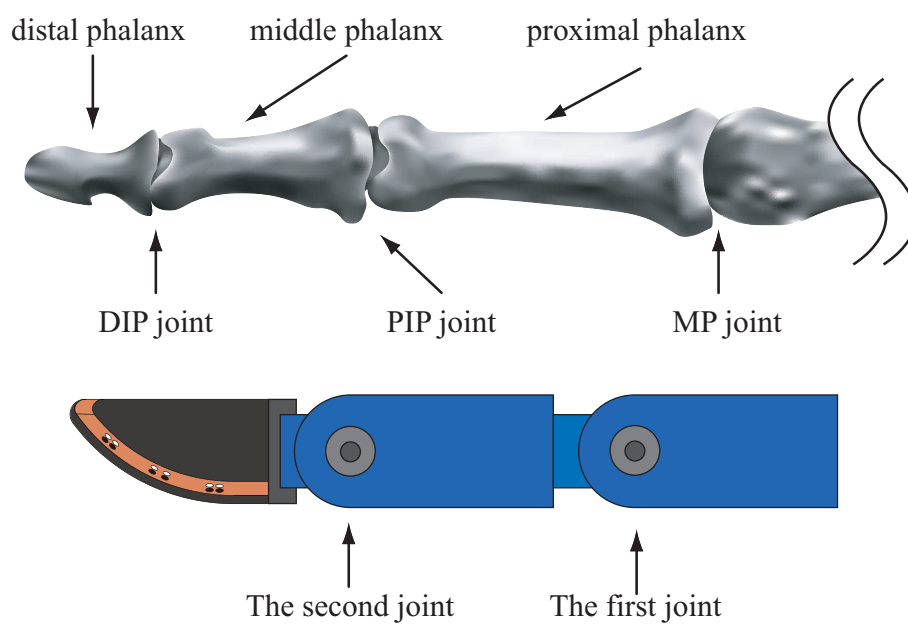


Fig. 5.4 Joint name of 1 finger

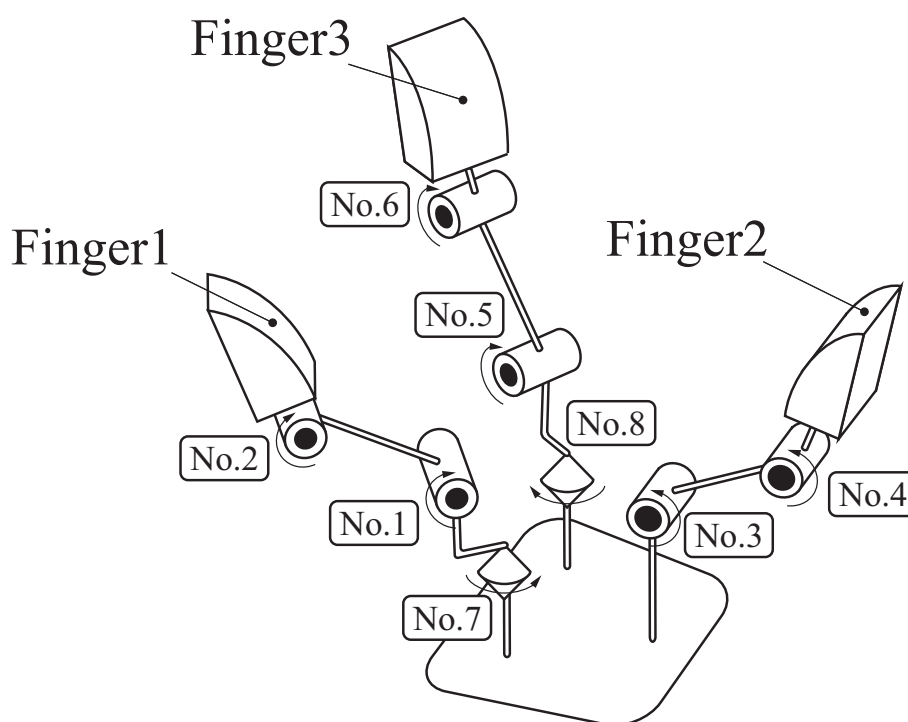


Fig. 5.5 Joint number and rotation direction of robot hand

続いて，屈曲関節1, 2と旋回関節の主な仕様を表5.1, 5.2に示す．対象物の形状に沿って指を配置する際に，指先の姿勢を高速に制御できるように，屈曲関節2と旋回関節のギア比は比較的小さくしてある．

Table 5.1 Specification of flexion joints

Item	Unit	Second joint	First joint
Motor model number	-	MAA01-1C-E020-SP	MAA01-1C-E020-SP
Gear ratio	-	1/90	1/150
Maximum torque	Nm	0.3	0.5
Maximum speed	r/min	111	66
Continuous torque	Nm	0.1	0.17
Continuous speed	r/min	50	30
Stall torque	Nm	0.11	0.19
Number of encoder pulses	pulse/rotation	200	200
Encoder resolution	pulse/rotation	72000	72000

モータドライバもハンド同様，ハーモニックドライブ社製のHA-680-4B-24を用いた．主な仕様は表5.3の通りである．各モータへの指令は， $-10.0 \sim +10.0 \text{ V}$ の範囲のアナログ電圧により与える．電圧に対応する指令値の種類としては，位置，速度，トルクのいずれかを設定可能である．本研究ではトルク制御を採用し，制御器内部で角度制御系を構築することにした．

Table 5.2 Specification of pivot joint

Item	Unit	Pivot joint
Motor model number	-	RSF-5A-50-E050-C-SP
Gear ratio	-	1/50
Maximum torque	Nm	0.9
Maximum speed	r/min	200
Continuous torque	Nm	0.29
Continuous speed	r/min	90
Stall torque	Nm	0.44
Number of encoder pulses	pulse/rotation	500
Encoder resolution	pulse/rotation	100,000

Table 5.3 Specification of motor driver of robot hand

Model number	HA-680-4B-24
Control mode	Position, velocity or torque control
Type of motor	DC24V, AC servo motor continuous current 4.9Arms (Instantaneous maximum current 17.2Arms)
Type of servo	Full digital servo
Framework	1 axis/board
Reference value	Analog voltage: $-10 \sim +10$ V Maximum position, velocity or torque at ± 10 V
Supply voltage	Motor: DC 24 V Controller: DC 24 V

5.1.1 ハンドパラメータ

表5.4に本ハンドの指モジュールのパラメータを示す．これらは，全指モジュールに共通のものである．各値の対応部位を図5.6に示す．これらの部位の名称及び値は以下の章でも共通である．

Table 5.4 Geometric parameters of finger

Item	Name	Value	Unit
Length of first link	L_1	43.5	mm
Length of second link	L_2	49.5	mm
Length of pivot link	L_p	35.0	mm
Length between center of palm and center of 1 or 3 finger	D	21.0	mm
Radius of fingertip curvature	R_f	41.7	mm
Length between first joint and center of fingertip curvature	L_c	46.6	mm
Offset angle of fingertip curvature	$\theta_{1\text{offset}}$	47.5	°

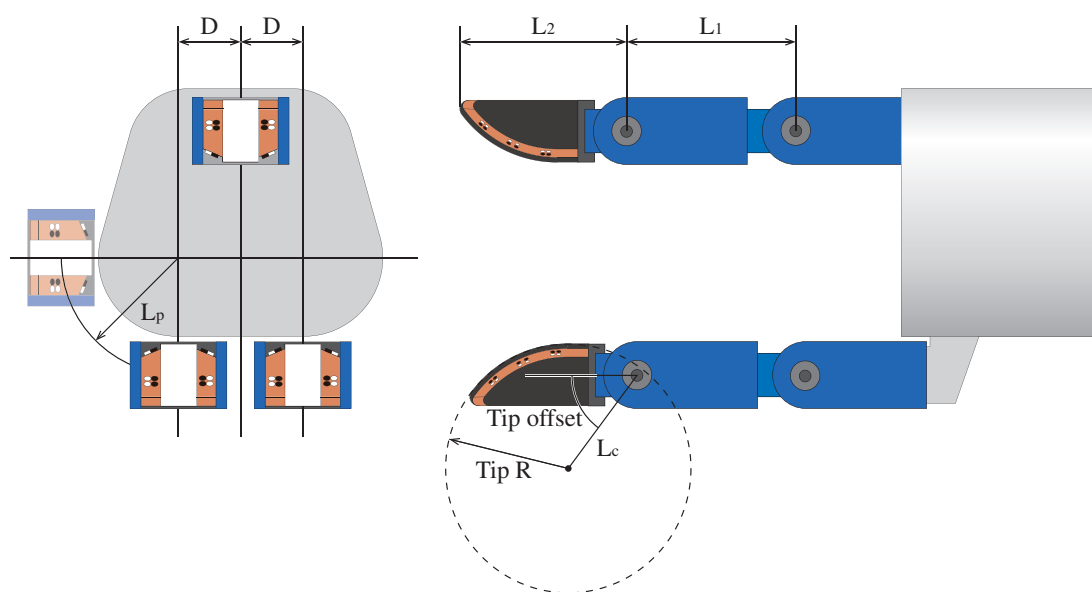


Fig. 5.6 Schematic diagram of geometric parameters of finger

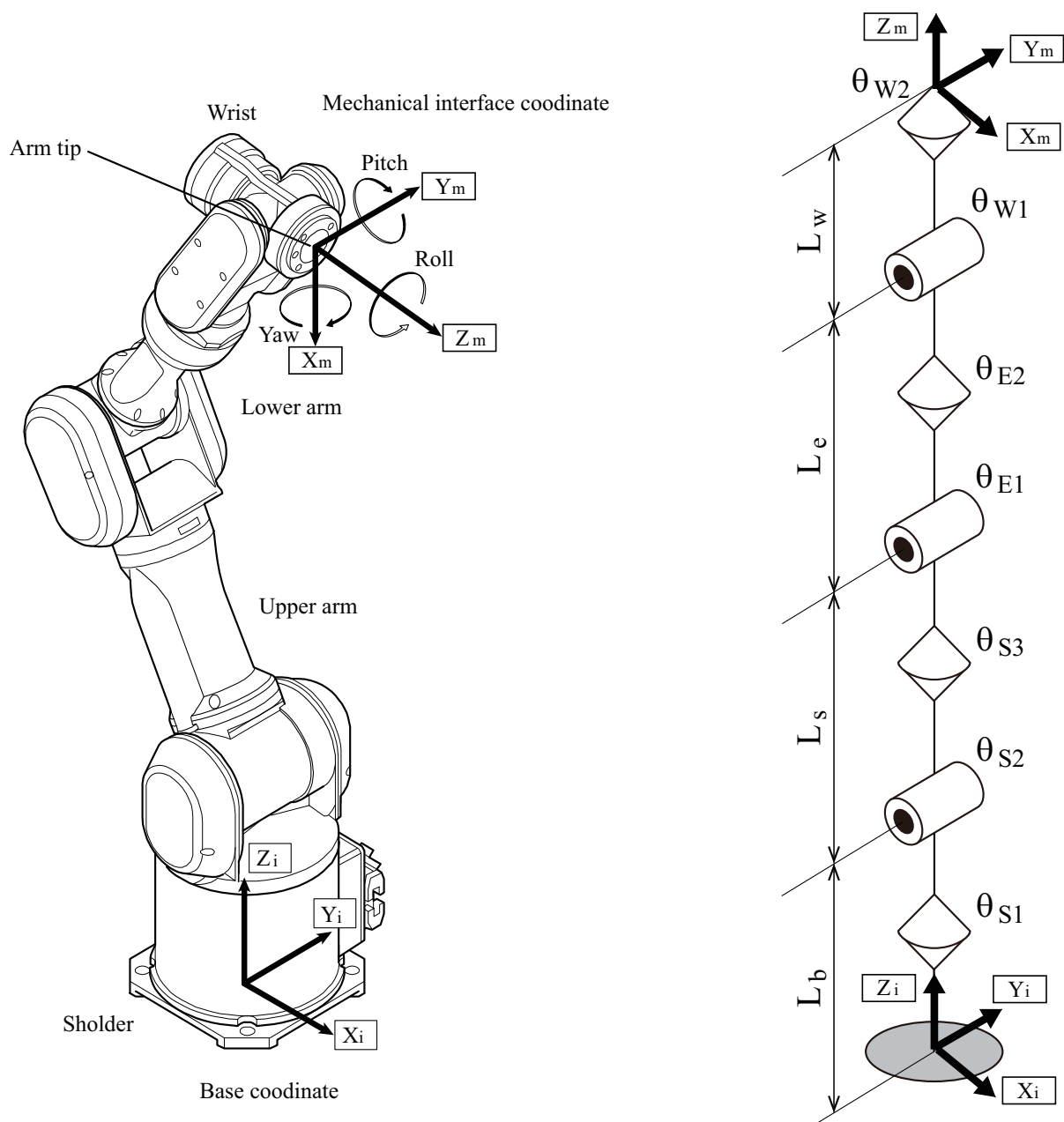


Fig. 5.7 PA10-7C arm joint definition

5.2 ロボットアームPA10

ロボットアームは、三菱重工製汎用ロボットPA10-7Cを用いた。関節配置とその回転方向を図5.7に、アームの各リンク長と可動領域を図5.8に示す。このロボットアームは、7関節の各軸にモータ、減速機、エンコーダを備えたもの

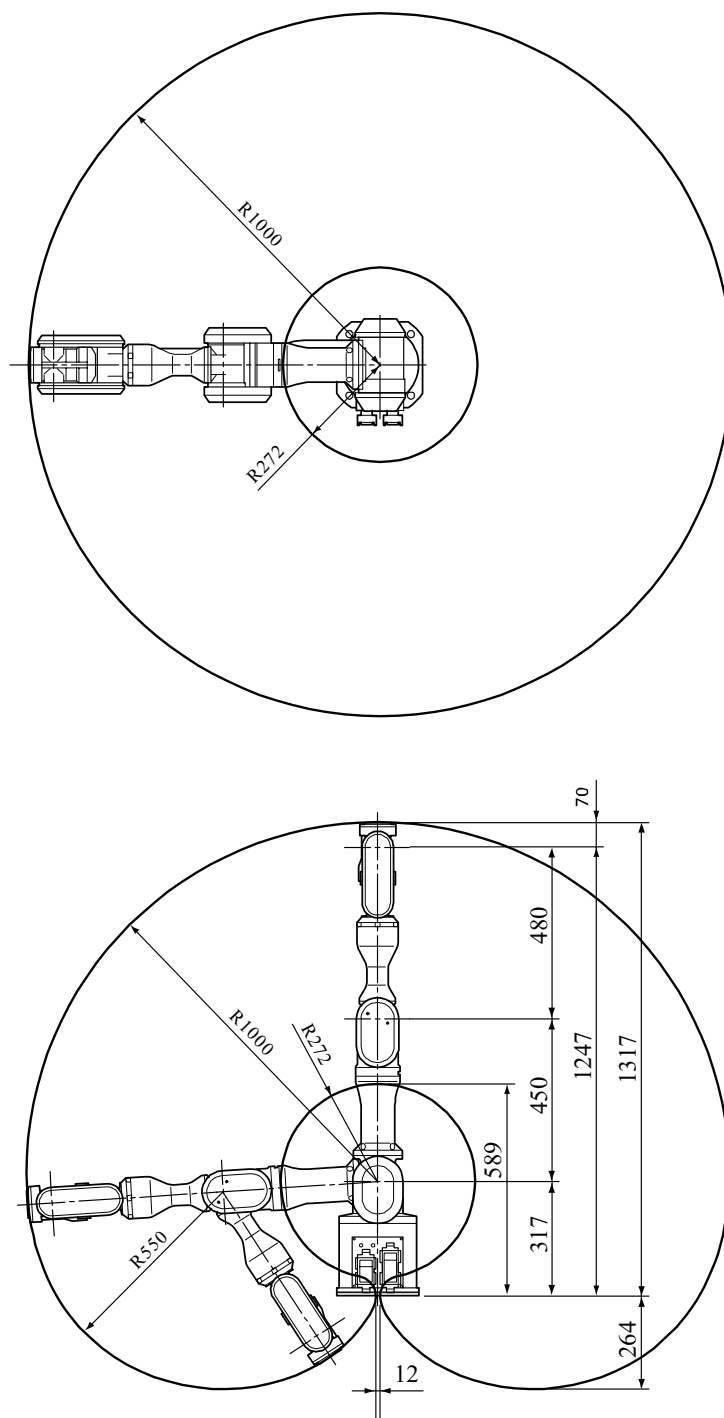


Fig. 5.8 Link length and movable range of PA10-7C arm

ので、手先の空間6自由度に対し1自由度の冗長軸を持つ関節構成である．
このアーム先端にロボットハンドが実装されており，対象物に対して様々な

位置・姿勢からハンドのアプローチが可能となっている。ロボットアームの主な仕様を表5.5, 5.6に示す。

Table 5.5 Specification of PA10-7C arm (1/2)

Item	Specification
Name	Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. universal robot arm
Type	Vertical multi-joint type
Number of joints	7
Joint configuration	R-P-R-P-R-P-R (from base surface of robot) (“R” is rotation joint, “P” is pivot joint)
Arm length	Shoulder reach : 317 mm(between base surface and S2 joint) Upper arm : 450 mm(between S2 and E1 joint) Lower arm : 480 mm(between E1 and W1 joint) Wrist reach : 70 mm (between W1 and mechanical interface surface)
Payload	10 kg
Drive system	AC servo motor, Non-Excitation Operative Brake and Brushless solver
Body weight	40 kg

Table 5.6 Specification of PA10-7C arm (2/2)

	Joint name	Software limit [deg]	Maximum speed [rad/sec]
Joint movement range and Maximum speed	S1 (rotation)	± 177	± 1
	S2 (pivot)	± 94	± 1
	S3 (rotation)	± 174	± 2
	E1 (pivot)	± 137	± 2
	E2 (rotation)	± 255	$\pm 2\pi$
	W1 (pivot)	± 165	$\pm 2\pi$
	W2 (rotation)	± 255	$\pm 2\pi$

アームのモータドライバは三菱重工汎用ロボット PA10 シリーズ用モータドライバを用いた。モータドライバの仕様を 5.7 に示す。LAN 通信により、指令値として 7 関節の角速度を与え、各関節角度のフィードバックを行う。この通信規格として ARCNET (Acronym of Attached Resource Computer Network) と呼ばれるマスタスレーブ間での信号衝突の少ない通信手法を採用しており、リアルタイムでの制御に適した構成である。このモータドライバは関節レベルの制御のみを行うため、アームの運動学モデル、および先端の位置・速度制御ループは dSPACE 上に構成した。

Table 5.7 Specification of PA10-7C servo driver

Item	Specification
Function	Velocity/Torque(current) control
Type of robot	Vertical multi-joint type
Type of motor	3-phase brushless DC motor DC 100V continuous current 10A (continuous current 4.9Arms (Instantaneous maximum current 17.2Arms) 15A)
Type of servo	Full digital servo 7 axis/board
Reference value from ARCNET	Velocity reference : $\pm 15bit(0.0002rad/sec/digit)(output\ axis)$ motor torque reference : $\pm 15bit(1000h = Ratedtorque)$ Large size motor(S1,S2) Rated torque: $4.64Nm$ Middle size motor(S3,E1) Rated torque: $2.00Nm$ Small size motor(E2,W1,W2)Rated torque : $0.29Nm$
Control performance	Velocity control (1000:1 for control range full scale) Speed variation rate within 1% (at rated load of actuator) Control function: Velocity control ($400\mu s$ digital PI + phase compensation control) Current loop: $100\mu s$ digital PI
Supply voltage	Motor : DC 100V/8A Brake : DC 24V/4A Controller : DC +5V/2A, DC +15V/1A, DC -15V/1A, DC 24V/1A

5.3 近接覚センサ計測回路

近接覚センサのアナログ信号は、ハンド指先からアーム根元までの比較的長い経路を伝って制御器に接続するため、モータや外部機器からの電磁ノイズが混入しやすい。

そこで、図5.9に示すように、各種ノイズ対策を行った。同図より、制御器でAD変換する際のダイナミックレンジを大きくするために、4章で述べた増幅回路とローパスフィルタ回路により、信号を増幅し、高周波ノイズの折り返し誤差を低減する。また、伝送経路上のケーブルや回路は全てシールドケーブルとシールドボックスにより保護しており、さらに各ケーブルの端部にフェライトコアを取り付けることで、外部機器からのノイズの混入をなるべく小さくしてある。この他、センサLEDをパルス発光させることで、発光量を増大し、また、センサ間での光の干渉を防いでいる、このLED点灯制御に関しては5.5節で述べる。

図5.10~5.12にノイズフィルタ有／無でのセンサ出力 x_c, y_c, I_{all} のノイズ量の変化を示す。それぞれの図は横軸が時間で、縦軸がサンプリング周波数

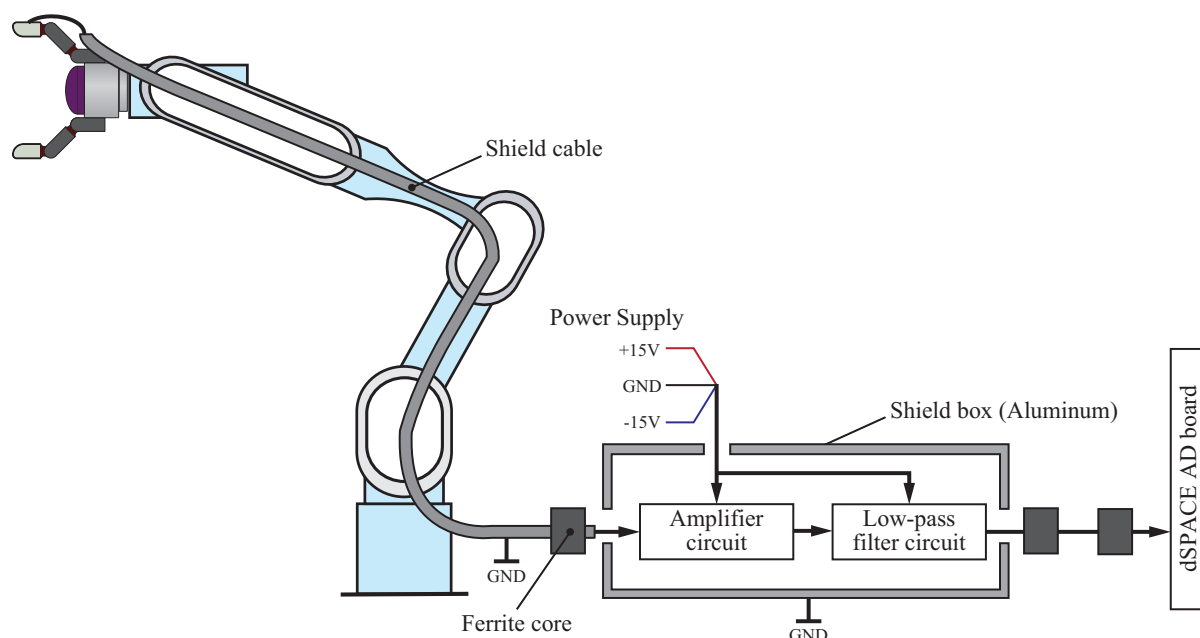


Fig. 5.9 Sensor signal transmission path and amplifier/filter circuit

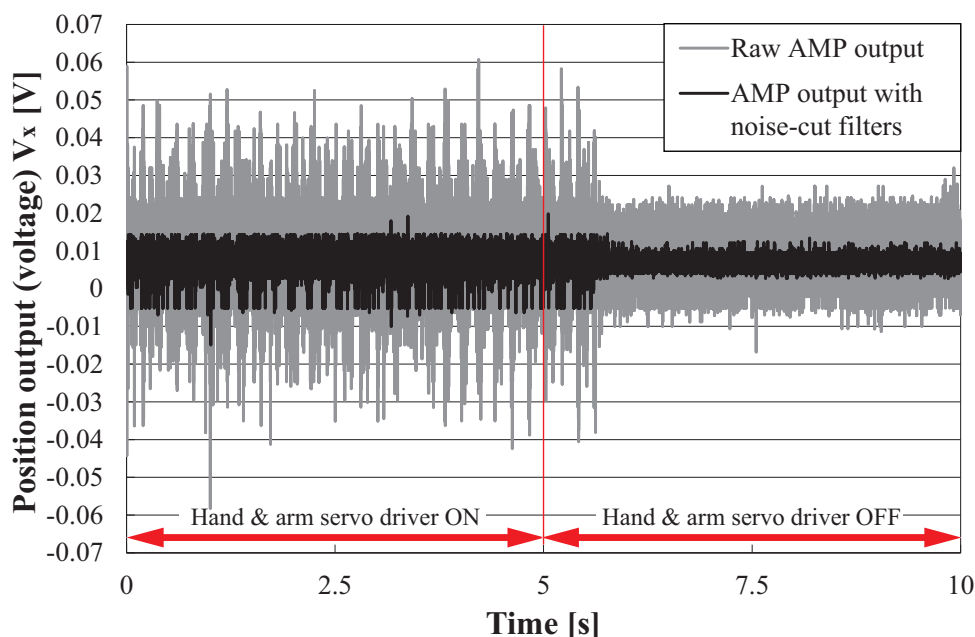


Fig. 5.10 Comparison plot of the raw AMP output (V_x) and the amp output with noise-cut filters

10 kHzで計測したアンプ回路の $V_x, V_y, V_{I_{all}}$ 出力¹である。なお、アンプ出力に生じる電磁ノイズの大きさを検証するために、センサLEDは消灯した状態とし、0～5秒間はハンドとアームのサーボドライバの電源を投入し、5～10秒以降は電源を切断して出力を計測した。

ノイズフィルタ無の場合、 $V_x, V_y, V_{I_{all}}$ 出力は、それぞれ、peak-to-peakで0.0119 V, 0.0879 V, 0.0879 Vの比較的大きなノイズが生じている。これに対し、ノイズフィルタ有では、peak-to-peakのノイズ値は、0.0348 V, 0.00391 V, 0.0308 Vまで減少している。従って、これらの出力を比較すると、 $V_x, V_y, V_{I_{all}}$ 出力のpeak-to-peakノイズ値はそれぞれ、71%, 59%, 65%低減できている。従って、本論文のノイズフィルタ付きアンプ回路はS/N比の高い計測が可能である。参考のため、0～5秒間の $V_x, V_y, V_{I_{all}}$ 出力の平均値と分散、peak-to-peak値を表5.10に示す。

¹アンプ出力($V_x, V_y, V_{I_{all}}$)はそれぞれ、センサ出力(x_c, y_c, I_{all})の計算に使用する電圧値である。出力($V_x, V_y, V_{I_{all}}$)の詳細は、4.1節で述べている。

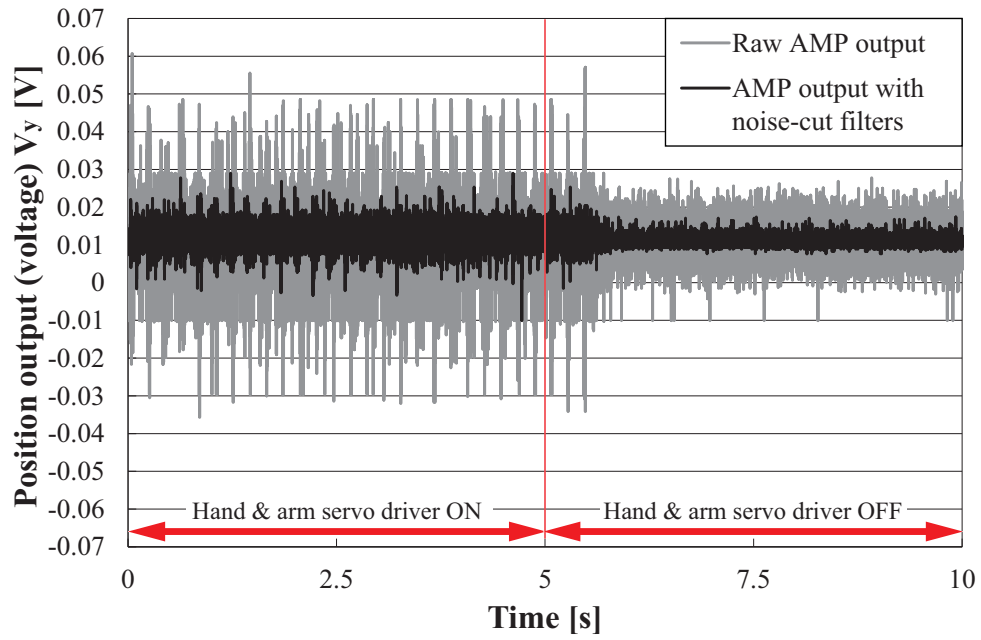


Fig. 5.11 Comparison plot of the raw AMP output (V_y) and the amp output with noise-cut filters

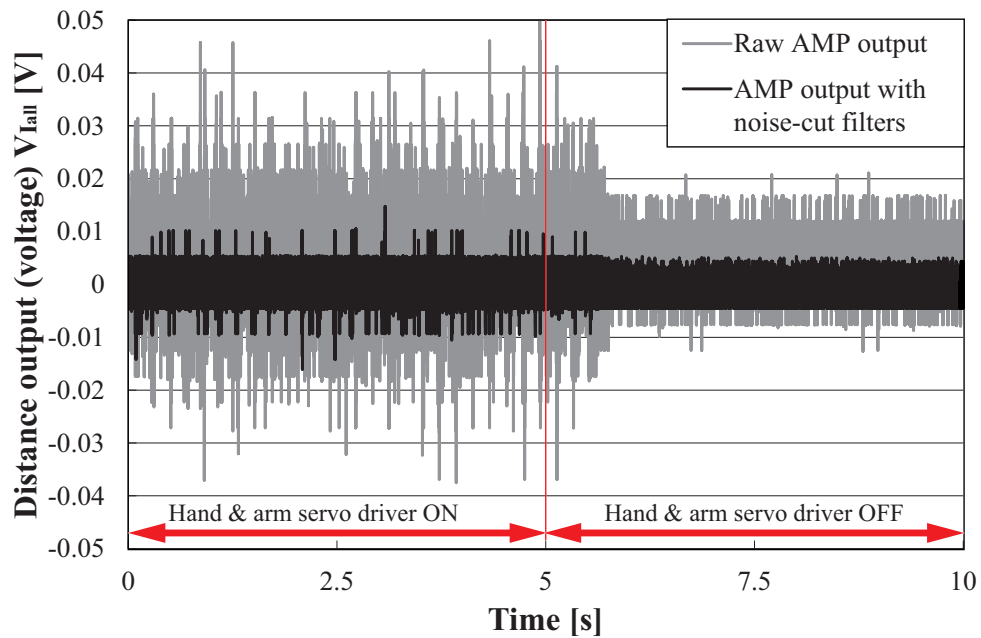


Fig. 5.12 Comparison plot of the raw amp output (V_{Iall}) and the amp output with noise-cut filters

Table 5.8 Noise of the raw V_{x_c} output and the V_{x_c} output with noise-cut filters

	Average [V]	Standard deviation [V]	peak-to-peak [V]
Raw V_{x_c} output	0.0087	0.0077	0.1190
V_{x_c} output with filters	0.0053	0.0024	0.0348

Table 5.9 Noise of the raw V_{y_c} output and the V_{y_c} output with noise-cut filters

	Average [V]	Standard deviation [V]	peak-to-peak [V]
Raw V_{y_c} output	0.0094	0.0067	0.0964
V_{y_c} output with filters	0.0098	0.0019	0.0391

Table 5.10 Noise of the raw $V_{I_{all}}$ output and the $V_{I_{all}}$ output with noise-cut filters

	Average [V]	Standard deviation [V]	peak-to-peak [V]
Raw $V_{I_{all}}$ output	0.0039	0.0064	0.0879
$V_{I_{all}}$ output with filters	-0.0002	0.0022	0.0308

5.4 制御器

5.4.1 dSPACE

本研究で用いた制御器“dSPACE”は，拡張ボックス内に，IOやAD等の専用ボードを挿入することで，用途に応じてカスタマイズ可能なリアルタイム制御器である．ボード追加の際に，ソフトウェア上での設定が必要がないため，機能拡張が容易であるという長所と，Matlab/Simulinkにより直感的なプログラム開発環境が用意されているという利点を持つ．

5.4.2 ハードウェア構成

拡張ボックスとしては，ボードを20個まで搭載可能なPX20を採用し，ボードは，プロセッサボードDS1005を1枚，DAボードDS2103/Aを1枚，カウンタボードDS3002/Aを2枚，ADボードDS2002/Aを1枚，IOボードDS4002を1枚，ARCNETモジュールボードDS4201を1枚，合計6枚を用いた．それぞれ，DAボードはハンドドライバへの指令，カウンタボードはハンドドライバからの角度値の取得，ADボードはセンサ値のサンプリング，IOボードはハン



Fig. 5.13 Overview of the controller(dSPACE, Expansion Boxes “PX20”).

ドドライバの設定・起動とセンサLEDの点灯制御，ARCNETモジュールボードはアームドライバとの通信に用いる．なお，プロセッサボードDS1005はdSPACEハードウェアの中核をなすボードであり，各種入出力ボードとホストPCとのインターフェースの役割を果たす．以下にプロセッサボードDS1005の概念図と各ボードの仕様を示す．

Table 5.11 Specification of processor board DS1005

Processor	PowerPC 750GX,
Operating frequency	1 GHz
Memory	1 MB L2 cache
Serial interface	transfer rates 115.2 Kbaud
Connection of I/O board	PHS++ bus Interface, 32 bit I/O bus
Host interface	One full-size 16-bit ISA

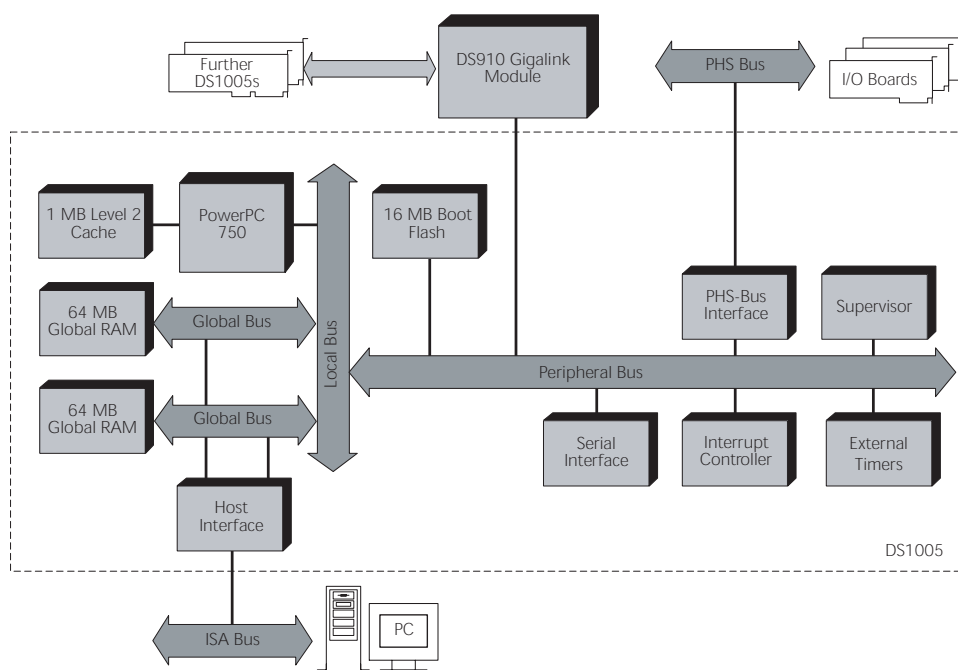


Fig. 5.14 Internal structure of DS1005

Table 5.12 Specification of DA board DS2103/A

Number of channels	32 CH
Resolution	16 bit
Settling time	10 μ s up to 0.012%
Output range	± 5 V, ± 10 V (programmable)

Table 5.13 Specification of counter board DS3002/A

Number of channel	6 CH
Resolution	32 bit
Operating mode	RS422 differential mode, TTL single-ended mode
Maximum input frequency	3 MHz

Table 5.14 Specification of AD board DS2002/A

Number of channels	32 CH(single-ended)
Resolution	16 bit
Settling time	5 μ s
Input range	± 5 V, ± 10 V (programmable)

Table 5.15 Specification of IO board DS4002

Number of digital IO	32 CH
Number of timing IO	8 CH
Number of external trigger input lines	2 CH
Voltage range	TTL input/output levels
Output current	Max. ± 75 mA
Input/output frequency	Max. 833 kHz(1 channel active)

5.4.3 ソフトウェア構成

dSPACEは、ホストPCで作成・コンパイルしたプログラムをdSPACE上にダウンロードして実行することで、リアルタイム制御を実行する。このホストPC上でのプログラム開発には、Matlab/Simulinkを用いる。Simulinkは機能ごとに用意されたブロックを接続することで、簡単にプログラムが作成できるため、ハンド・アーム系、センサ系の制御をプログラム上でモジュール化することができ、複雑なプログラムを見やすく、かつ簡潔に記述できる。さらに、dSPAC社製のソフトウェアであるControlDeskを用いることで、実験結果をプロットするGUIの作成も容易である。

SPACEの基本システムの概要を図5.15に示す。Simulink上でプログラムを作成し、ビルドを実行することで、ユーザソフトウェア部分はReal-Time WorkshopによってCコードが生成され、同様にインターフェイス部分は、RTIによってCコードが生成される。これらのコードをコンパイラがコンパイルし、生成されたオブジェクトファイルをリンクしてリアルタイムプロセッサ用の実行ファイルを生成する。次に、Control Deskを起動し、作成した実行ファイルを読み出すことで、dSPACE上のリアルタイムプロセッサで制御プログラムを実行する。また、Control Desk上でGUIを作成することが可能であり、リアルタイムプロセッサで実行されている制御プログラムの変数のモニタやデータの取得、リアルタイムでの定数の変更が可能である。これらによってPIDゲインの調整などをプログラムを動作させながらスムーズに行うことができる。また、各種ライブラリやトリガーを使用することによってカウンタリセット機能の作成やデータ取得タイミングを任意に設定可能である。SimulinkプログラムとControl DeskのGUIの一例を図5.16と図5.17にそれぞれ示す。

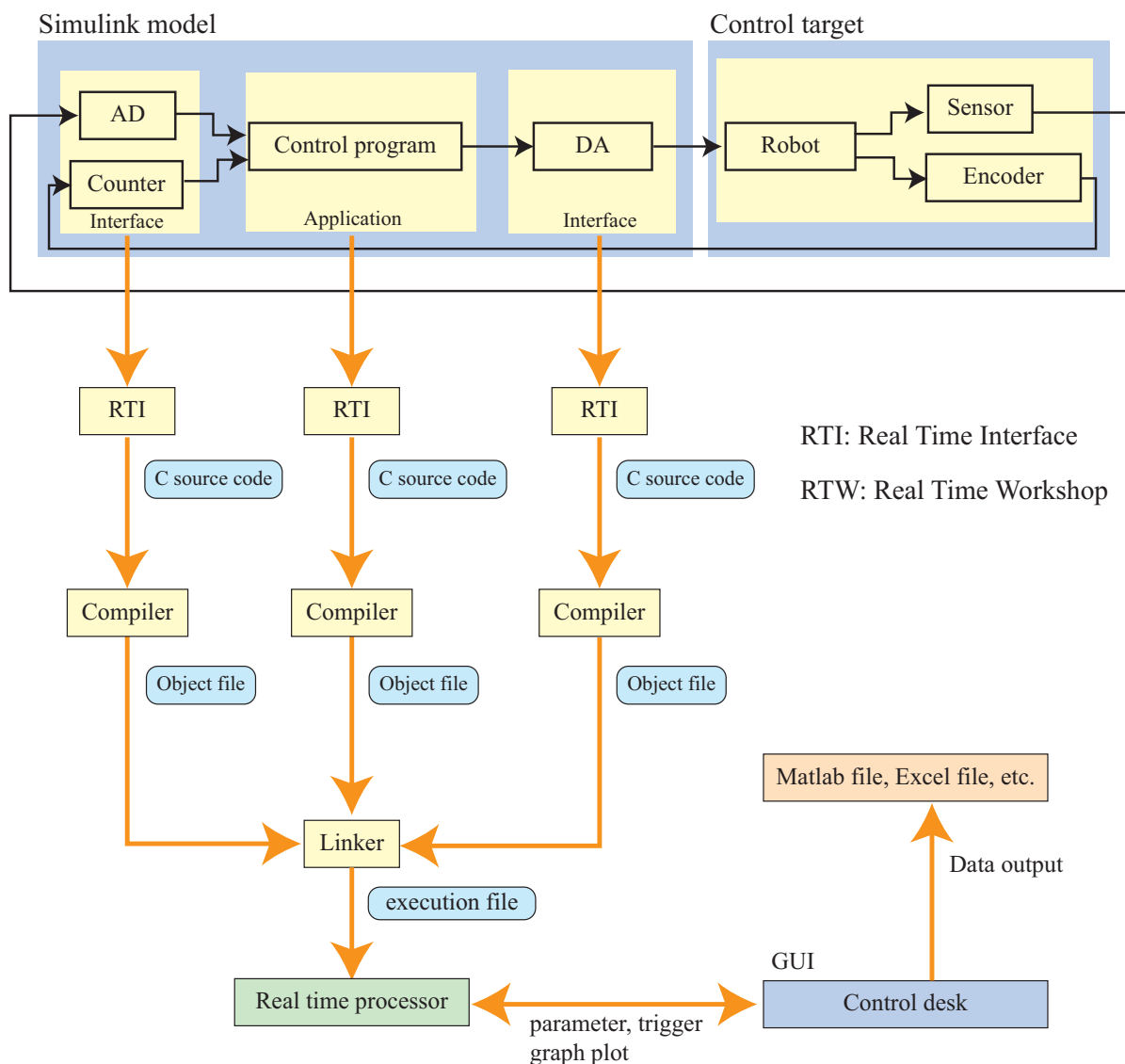


Fig. 5.15 Overview of dSPACE system

図5.16より、Simulinkプログラムは、上から1)グローバル変数定義，2)入力ブロック（実験時間，関節角度，センサ値を取得），3)ハンド・アームの指令値生成，4)ハンド・アームコントローラと出力ブロックで構成される．同図のように，プログラムを機能ごとに分割しているため，制御の流れが理解しやすく，また，追加・修正が容易である．なお，各ブロックの内，特に重要である「センサ値取得ブロック」と，「ハンド・アームコントローラ」内の制御については，次節で説明する．

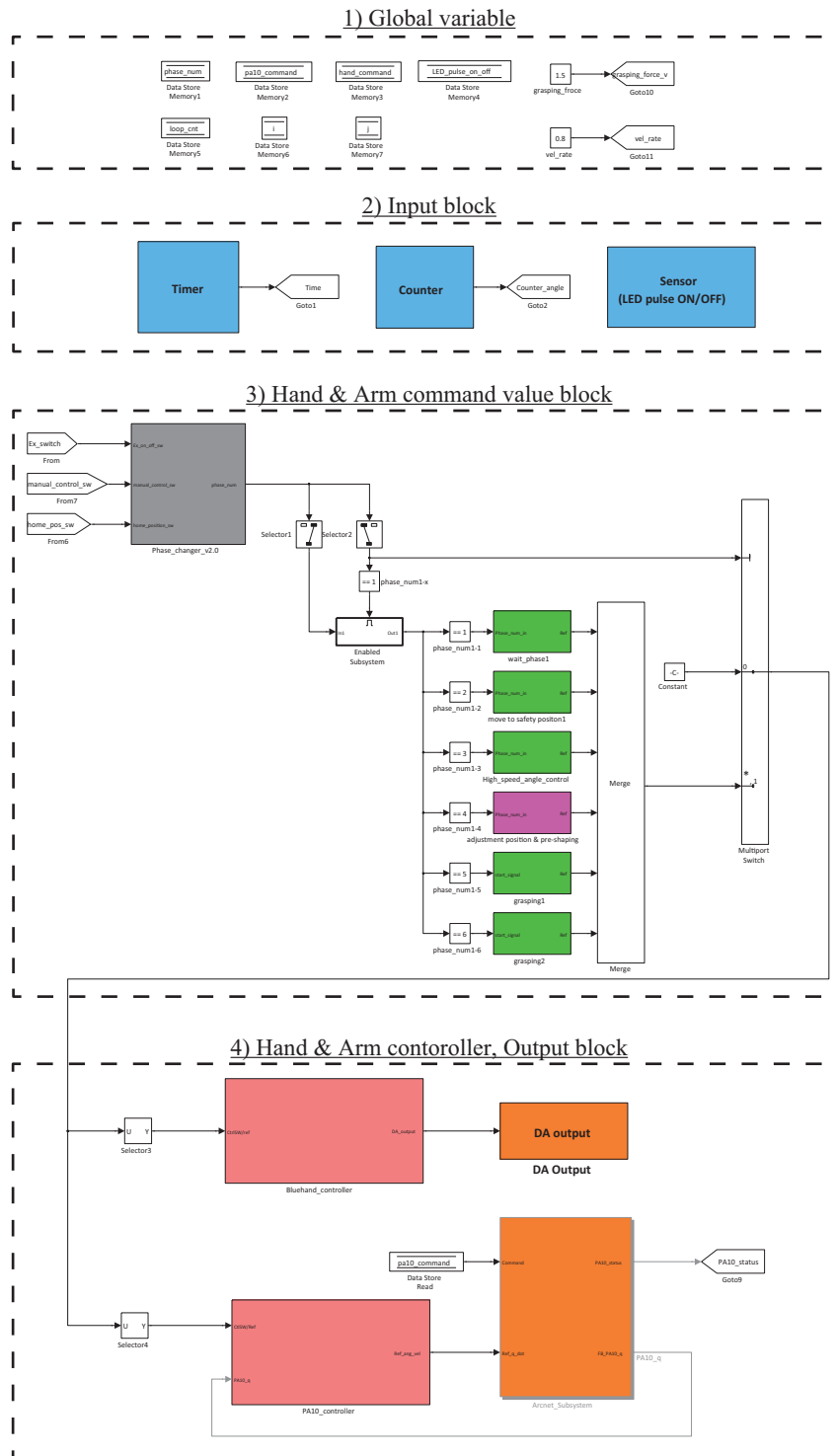


Fig. 5.16 Example of Simulink program

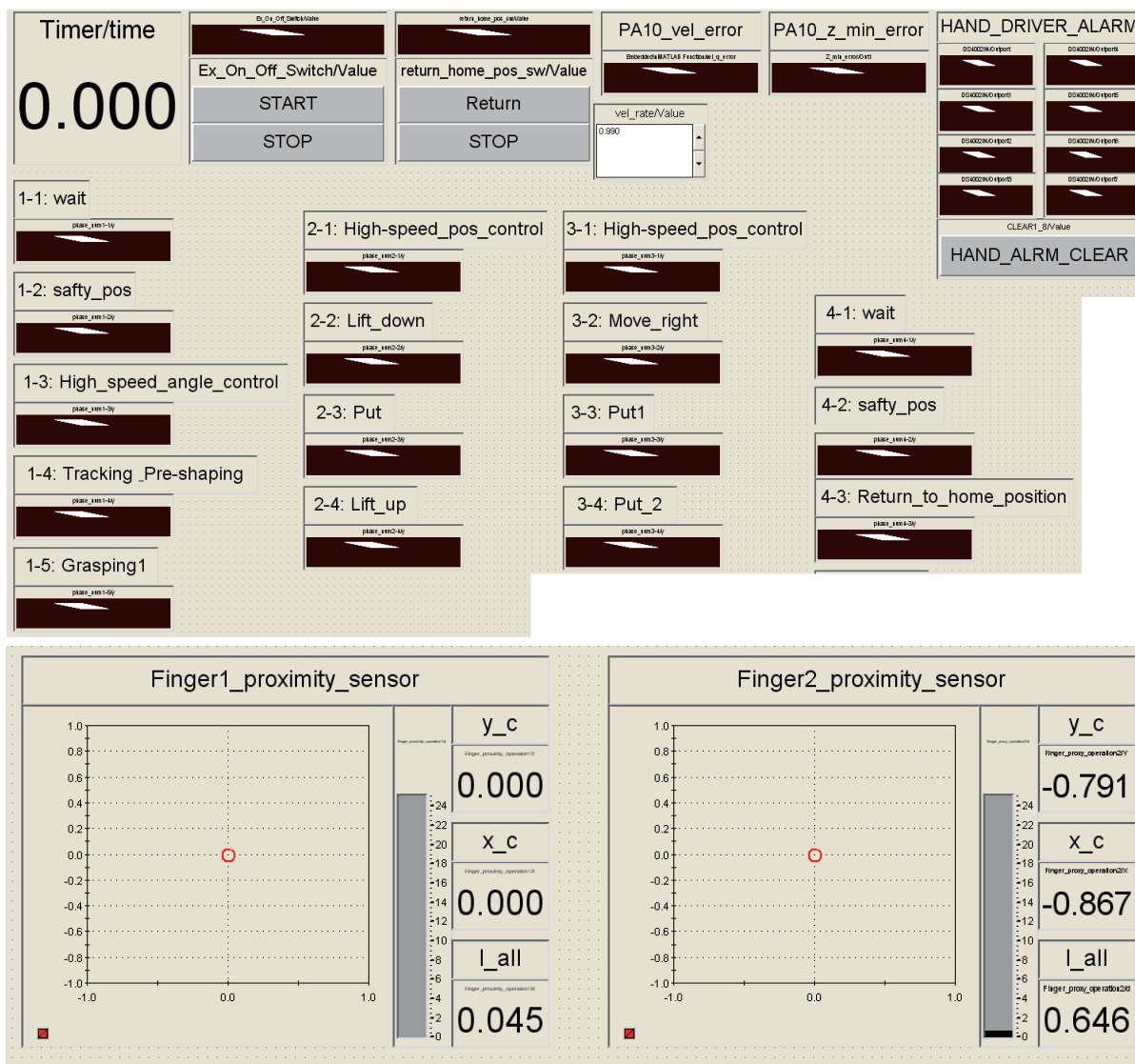


Fig. 5.17 GUI of ControlDesk

また，図5.17に示すように，コントロールデスクのGUIでは，あらかじめ用意されたスイッチや各種表示器を自由に配置して使いやすいインターフェースを構成できる．

5.5 近接覚センサのLED点灯制御

ロボットハンドに複数の近接覚センサを搭載し、同時に計測を行うと、センサ間でLEDの光が直接入射し、正しい測定結果が得られないという問題が生じる。また、センサ出力のS/N比向上のためには、LEDに大電流を流すことで、発光量を増大するほうが良いが、発熱による素子の劣化や故障のリスクがある。

そこで、指先と掌の合計4つの近接覚センサのLEDを順番にターンオン、オフ制御することで、センサ間での直接光の入射を防止し、かつ十分なLED発光量を保つことにした。LEDをターンオン、オフするための回路と、入力パルス信号を図5.18に示す。各LEDのオンタイミングが重ならないように、位相のずれた4つのPWM信号でLEDを駆動し、1センサごとに計測を行う。また、計測の際に、蛍光灯などの外乱光の影響を小さくするために、LED点灯時と消灯時の出力の背景差分をとることで、定常状態での外乱光の影響を補正している。

0.1msで4サンプル取得し、4平均を行うために、LEDのON時間は、計測時間0.4 [ms]とセンサ出力が安定するまでの待ち時間0.1msを足した0.5msとした。また、LED消灯時の計測待ち時間は0.3msとし、計測時間は同じく0.4msとした。従って、1センサの出力計測に合計、1.2msの時間を要するため、4つ全てのセンサ値が更新されるのは4.8ms周期となる。このため、ハンド・アーム系の制御周期はセンサ値の更新周期よりも遅い5.0msとした。この点灯制御により、各指先において物体面の傾きと距離を正しく計測できるシステムとなっている。

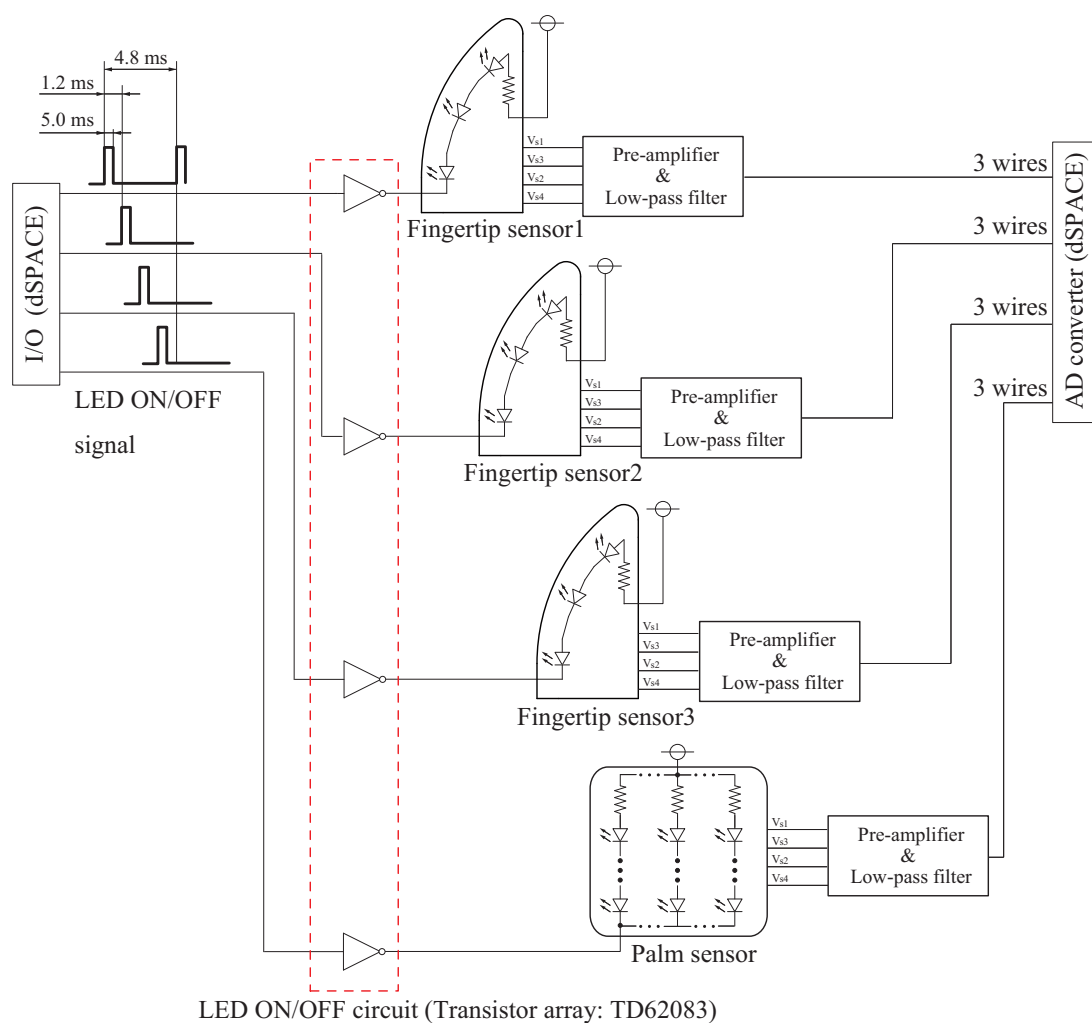


Fig. 5.18 Proximity Sensor's LED turn ON/OFF circuit

5.6 ハンド制御

ハンド各関節のモータドライバはトルク制御方式とし、微分先行型PID制御に基づく関節角度制御系をdSPACE上に構築した。制御式を式(5.1)~(5.3)に示す。

$$\tau_{i,1-\text{ref}} = K_{i,P1}(e_{i,1}) + K_{i,I1} \int (e_{i,1}) dt + K_{i,D1} \frac{d\theta_1}{dt} \quad (5.1)$$

$$\tau_{i,2-\text{ref}} = K_{i,P2}(e_{i,2}) + K_{i,I2} \int (e_{i,2}) dt + K_{i,D2} \frac{d\theta_2}{dt} \quad (5.2)$$

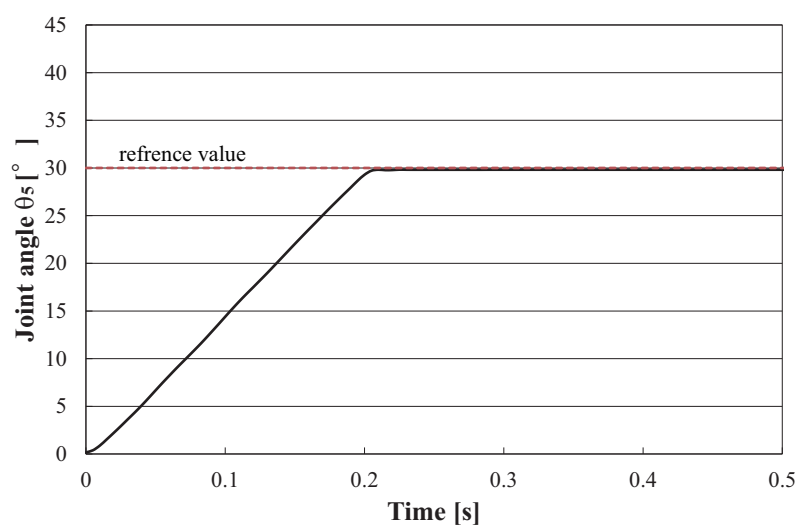
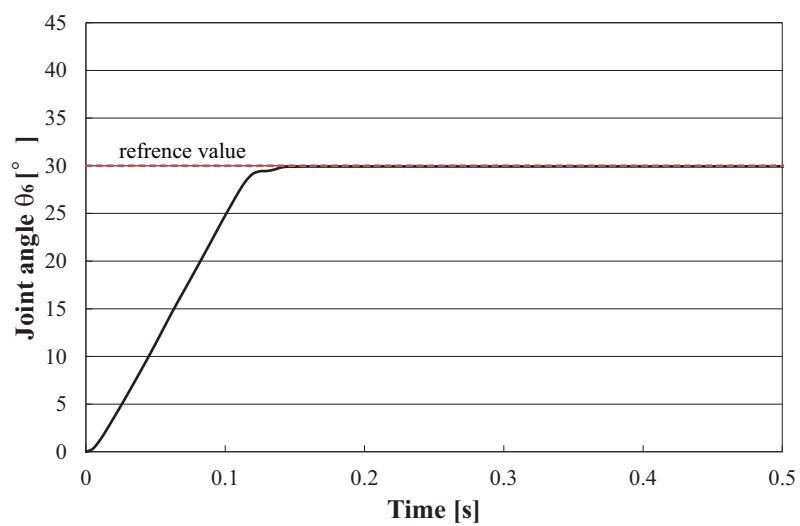
$$\tau_{i,p-\text{ref}} = K_{i,P3}(e_{i,p}) + K_{i,I3} \int (e_{i,p}) dt + K_{i,D3} \frac{d\theta_p}{dt} \quad (5.3)$$

$\tau_{i,1-\text{ref}}$, $\tau_{i,2-\text{ref}}$, $\tau_{i,p-\text{ref}}$ は、指 i の屈曲関節 1, 2, および旋回関節のトルク指令値であり、 $e_{i,1}$, $e_{i,2}$, $e_{i,3}$ は指 i の各関節の目標角度と現在角度 $\theta_{i,1}$, $\theta_{i,2}$, $\theta_{i,p}$ との偏差である。 $K_{i,P1}$, $K_{i,P2}$, $K_{i,P3}$ は比例ゲインであり、 $K_{i,I1}$, $K_{i,I2}$, $K_{i,I3}$ は積分ゲイン、 $K_{i,D1}$, $K_{i,D2}$, $K_{i,D3}$ は微分ゲインである。表 5.16 に使用した PID 制御のゲインパラメータを示す。なお、微分先行型 PID 制御を採用した理由は、ステップ応答状の角度指令が PID 制御系に入力された際に、過大なトルク指令値が生じないようにするためである。

第 3 指の屈曲関節 1 と 2, および、旋回関節に対し、目標角度 30.0° のステップ信号を加えた際の各関節角度の応答波形を図 5.19~5.21 に示す。目標角度に対し 90% の角度に立ち上がるまでの時間は、屈曲関節 1 で 0.18 s, 屈曲関節 2 で 0.105 s, 旋回関節で 0.035 s であり、いずれの関節も速い応答性を示しており、また、目標値への収束性も良い。

Table 5.16 PID control gain of each joint of the hand

Finger No.	Joint No.	Joint name	Gain symbol	Value
1	1	Flexion 1st. joint	$K_{1,P1}$	500.0
1	1	Flexion 1st. joint	$K_{1,I1}$	2.0
1	1	Flexion 1st. joint	$K_{1,D1}$	2.7
1	2	Flexion 2nd. joint	$K_{1,P2}$	320.0
1	2	Flexion 2nd. joint	$K_{1,I2}$	65.0
1	2	Flexion 2nd. joint	$K_{1,D2}$	1.8
2	3	Flexion 1st. joint	$K_{2,P1}$	420.0
2	3	Flexion 1st. joint	$K_{2,I1}$	4.0
2	3	Flexion 1st. joint	$K_{2,D1}$	2.3
2	4	Flexion 2nd. joint	$K_{2,P2}$	300.0
2	4	Flexion 2nd. joint	$K_{2,I2}$	70.0
2	4	Flexion 2nd. joint	$K_{2,D2}$	1.7
3	5	Flexion 1st. joint	$K_{3,P1}$	550.0
3	5	Flexion 1st. joint	$K_{3,I1}$	4.0
3	5	Flexion 1st. joint	$K_{3,D1}$	3.0
3	6	Flexion 2nd. joint	$K_{3,P2}$	350.0
3	6	Flexion 2nd. joint	$K_{3,I2}$	65.0
3	6	Flexion 2nd. joint	$K_{3,D2}$	2.7
1	7	Pivot joint	$K_{1,P3}$	110.0
1	7	Pivot joint	$K_{1,I3}$	60.0
1	7	Pivot joint	$K_{1,D3}$	0.7
3	8	Pivot joint	$K_{3,P3}$	120.0
3	8	Pivot joint	$K_{3,I3}$	70.0
3	8	Pivot joint	$K_{3,D3}$	0.9

Fig. 5.19 Step response characteristic of first flexion joint θ_1 Fig. 5.20 Step response characteristic of first flexion joint θ_2

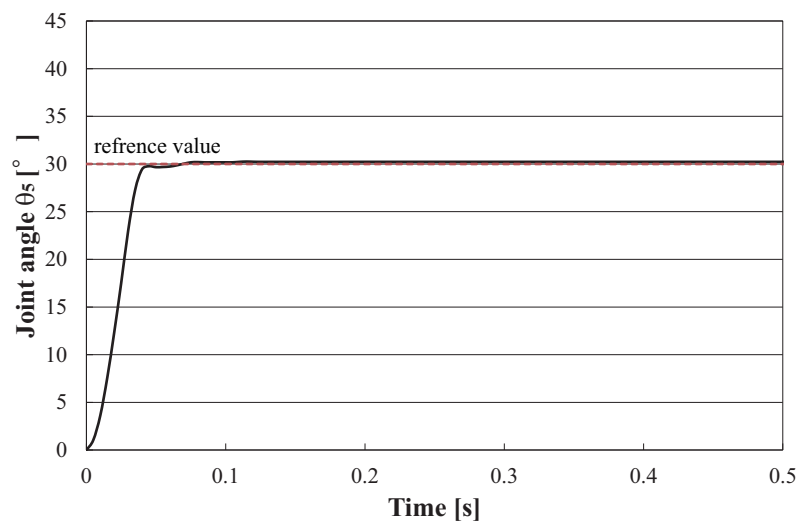


Fig. 5.21 Step response characteristic of first pivot joint θ_p

5.7 PA10 アーム制御

三菱重工のPA10 マニュアル^[69]を参考に，関節角度制御，手先速度制御，手先位置制御の3つの制御モードをdSPACE上に構築した．PA10アームの制御ブロックの模式図を図5.22に示す．また，運動学的な特異点の近傍で過大な角速度指令値が発生しないように，特異点適合法 (Singularity consistent method)^[72, 73, 74, 75]を用いた減速制御を実装してある．

実際の制御プログラムでは，関節角度制御により，直立姿勢から適当な初期姿勢に移動し，手先位置制御で物体近傍にアーム手先位置・姿勢を調整する．そして，センサ出力が“0”となるようにアーム手先速度制御を行うことで，物体とアーム手先の相対位置・姿勢の調整を行っている．ここでは，後の章で述べるハンドとアームの統合制御の際に使用する手先速度制御と特異点適合法について述べる¹．

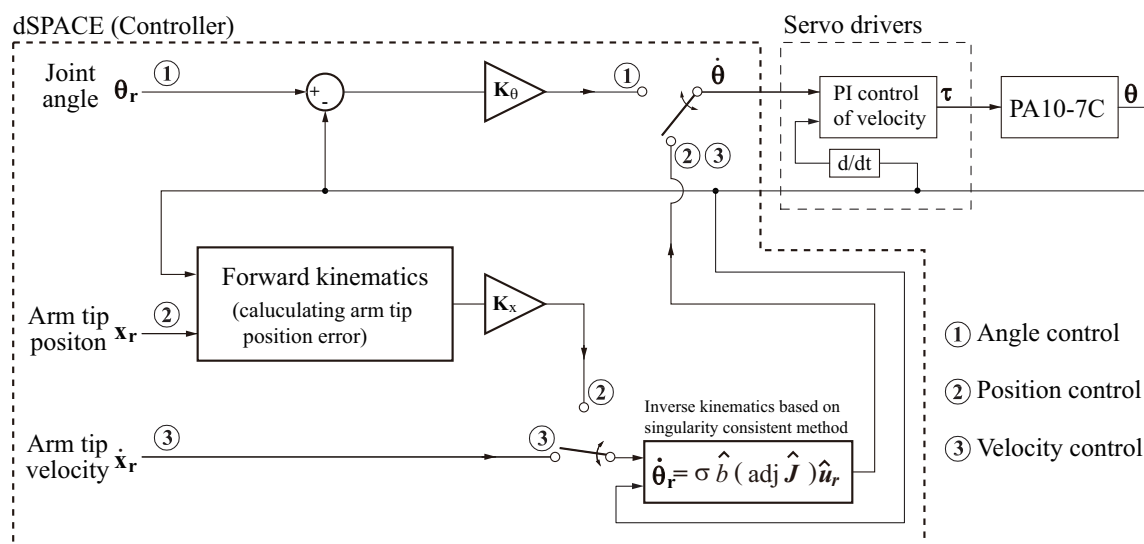


Fig. 5.22 Schematic diagram of PA10-7C arm control system

¹なお，dSPACEとPA10ドライバの間での通信プログラムは，叶の修士論文^[70]の成果であるため，付録Aに記載する

5.7.1 拡張ヤコビ行列を用いた手先速度制御

マニピュレータの手先速度制御では，目標手先速度を与え，これを逆ヤコビ行列により関節角速度に変換することで各関節を制御する．PA10アームのように手先の空間自由度に対し冗長自由度を持つマニピュレータでは，ヤコビ行列は非正方行列となる．このことから，PA10アームの手先速度制御を行う場合，1)疑似逆行列を用いてノルム最小解を求める手法と，2)冗長自由度による動作を追加した拡張ヤコビ行列の逆行列を用いる手法とがある．拡張ヤコビ行列の逆行列を用いる手法は，手首，肘，肩の3点からなる平面と適当な基準面との角度をアーム角度 ϕ とし，ヤコビ行列に導入することで，アーム手先の他に肘関節の位置を自由に制御できるメリットがある．これは，将来的にアームのリンク部分に近接覚センサを導入し，肘関節の運動により障害物回避を行う場合や，遠隔操作において対象物を隠蔽しないように肘部の位置を調整する際に利用できるため有用性が高いと考えた．

そこで，本論文では拡張ヤコビ行列を用いて目標手先速度を関節角速度に変換する．式(5.4)に拡張ヤコビ行列 J_A の定義を示す．

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J} \\ \mathbf{J}_\phi \end{bmatrix} = \mathbf{J}_A \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (5.4)$$

ここで， $\dot{\mathbf{x}}$ が手先速度であり， \mathbf{J} はマニピュレータのヤコビ行列， \mathbf{J}_ϕ は冗長自由度を利用した運動を表す行ベクトルである．文献^[71]ではアーム角度 ϕ を使用しているが，PA10アームの肘位置に影響を与える関節は肩第一関節 θ_{S1} であるため，本論文では制御を単純化するためにアーム角度 ϕ の代わりに肩第一関節 θ_{S1} に指令を直接与えることとし，行ベクトル $\mathbf{J}_\phi = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$

とした．この場合の拡張ヤコビ行列を式(5.5)に示す．

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\theta}_{S1} \end{bmatrix} = J_A \dot{\boldsymbol{\theta}} = \begin{bmatrix} J_{1,1} & J_{1,2} & J_{1,3} & J_{1,4} & J_{1,5} & J_{1,6} & J_{1,7} \\ J_{2,1} & J_{2,2} & J_{2,3} & J_{2,4} & J_{2,5} & J_{2,6} & J_{2,7} \\ J_{3,1} & J_{3,2} & J_{3,3} & J_{3,4} & J_{3,5} & J_{3,6} & J_{3,7} \\ J_{4,1} & J_{4,2} & J_{4,3} & J_{4,4} & J_{4,5} & J_{4,6} & J_{4,7} \\ J_{5,1} & J_{5,2} & J_{5,3} & J_{5,4} & J_{5,5} & J_{5,6} & J_{5,7} \\ J_{6,1} & J_{6,2} & J_{6,3} & J_{6,4} & J_{6,5} & J_{6,6} & J_{6,7} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{S1} \\ \dot{\theta}_{S2} \\ \dot{\theta}_{S3} \\ \dot{\theta}_{E1} \\ \dot{\theta}_{E2} \\ \dot{\theta}_{W1} \\ \dot{\theta}_{W2} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

ここで，手先速度 $\dot{\mathbf{x}} = [V_{X_m} \ V_{Y_m} \ V_{Z_m} \ \omega_{X_m} \ \omega_{Y_m} \ \omega_{Z_m}]^T$ であり， $V_{X_m}, V_{Y_m}, V_{Z_m}$ はアーム手先座標 X_m, Y_m, Z_m 方向の並進速度， $\omega_{X_m}, \omega_{Y_m}, \omega_{Z_m}$ は X_m, Y_m, Z_m 軸周りの手先姿勢の回転速度である．また， $J_{i,j}$ はPA10アームのヤコビ行列の第 i 行目，第 j 列目の成分であり， $\dot{\theta}_{S1}, \dot{\theta}_{S2}, \dot{\theta}_{S3}$ はそれぞれPA10の肩第一関節，第二関節，第三関節の角速度， $\dot{\theta}_{E1}, \dot{\theta}_{E2}$ はそれぞれ肘第一関節，第二関節の角速度， $\dot{\theta}_{W1}, \dot{\theta}_{W2}$ はそれぞれ手首第一関節，第二関節の角速度である．拡張ヤコビ行列は 7×7 の正方行列であるため，逆行列を計算可能である．そこで，式(5.6)の速度の逆運動学により，目標手先速度 $\dot{\mathbf{x}}_r = [\dot{\mathbf{x}} \ \dot{\theta}_{S1}]^T$ から関節角速度 $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ に変換し，PA10ドライバに $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ を指令値として与える．

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = J_A^{-1} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\theta}_{S1} \end{bmatrix} = J_A^{-1} \dot{\mathbf{x}}_r \quad (5.6)$$

ここで， $\dot{\theta}_{S1} = 0$ とし，肩第一関節 θ_{S1} を固定するのが最も簡単であるが，この場合，手先位置・姿勢の可動範囲が大きく制限される．そこで，本論文では，ワールド座標の原点と手先位置 (P_x, P_y) とを結んだベクトルの角度に対し，肩第一関節 θ_{S1} の角度が一致するように制御することとした．制御式を式(5.7)に示す．

$$\dot{\theta}_{S1} = \tan^{-1}(P_y, P_x) \quad (5.7)$$

式(5.7)の P_x, P_y は，ワールド座標系を原点とするアーム手先の X_i, Y_i 方向の位置であり，順運動学により計算する．この制御により，手先位置の方向に θ_{S1} が常に回転するため，手先の可動範囲を比較的大きくとれる．

5.7.2 特異点適合法による減速制御

PA10 アームには，図5.23に示すように，(a)肩特異点，(b)肘特異点，(c)手首特異点があり，これらの姿勢の周辺では速度の逆運動学が計算できない．具体的には，運動学的な特異点の近傍では，式(5.6)のヤコビ行列式 $|\mathbf{J}_A| \approx 0$ となることで，過大な関節角速度指令値が計算される．ここで，式(5.6)の逆ヤコビ行列は，スカラー量 $1/|\mathbf{J}_A|$ とベクトル量 $(adj \mathbf{J}_A)\dot{\mathbf{x}}_r$ で構成され， $1/|\mathbf{J}_A|$ は目標手先速度を実現するための符号付き拡大係数であり， $(adj \mathbf{J}_A)\dot{\mathbf{x}}_r$ は目標手先速度方向を実現する成分と見なせる．このうち， $(adj \mathbf{J}_A)\dot{\mathbf{x}}_r$ は，特異点近傍においても計算できるため，特異点適合法では，アーム姿勢に応じて $1/|\mathbf{J}_A|$ の代わりに適当な拡大係数 \hat{b} と符号 σ を設定することで，安定した動作を実現する．特異点適合法による速度の逆運動学を式(5.8)に示す．なお，以降では，計算順序の関係から，目標手先速度と拡張ヤコビ行列の余因子行列の計算手法について述べた後，拡大係数 \hat{b} と符号 σ の設定について述べる．

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \sigma \hat{b} (adj \hat{\mathbf{J}}_A) \hat{\mathbf{u}}_r \quad (5.8)$$

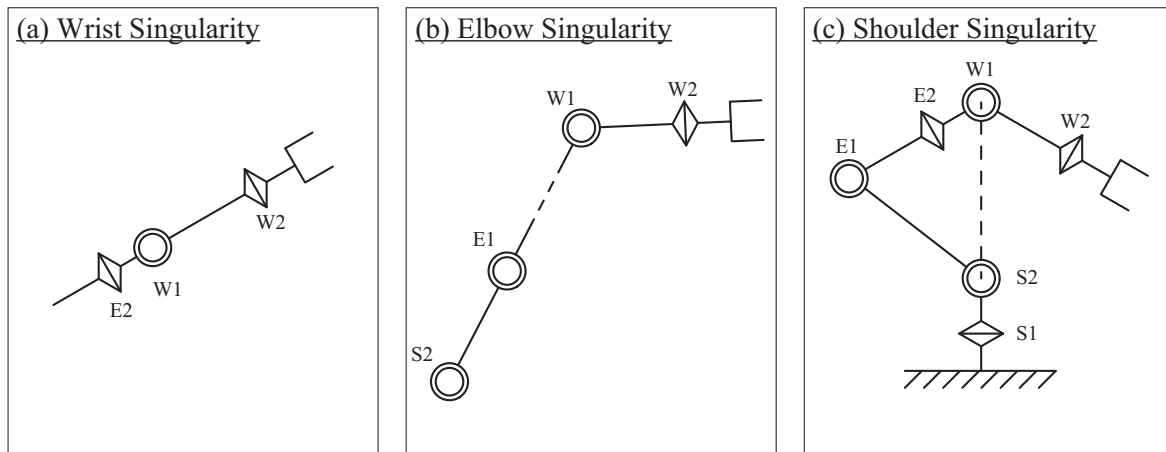


Fig. 5.23 Types of singularities of the arm

正規化された目標手先速度と余因子行列の算出

式(5.8)の $\hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{r}}$ は手先目標速度の単位ベクトルであり、式(5.9)~(5.11)により求める。

$$\hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{r}} = \frac{1}{\hat{v}_{\mathbf{r}}} \mathbf{T}_{\mathbf{v}}^{-1} \dot{\mathbf{x}}_{\mathbf{r}} \quad (5.9)$$

$$\hat{v}_{\mathbf{r}} = \|\mathbf{T}_{\mathbf{v}}^{-1} \dot{\mathbf{x}}_{\mathbf{r}}\| \quad (5.10)$$

$$\mathbf{T}_{\mathbf{v}} = \sqrt{2} \text{diag} [v_{\max_{\text{sc}}} \ v_{\max_{\text{sc}}} \ v_{\max_{\text{sc}}} \ \omega_{\max_{\text{sc}}} \ \omega_{\max_{\text{sc}}} \ \omega_{\max_{\text{sc}}} \ \dot{\theta}_{\text{S1max}_{\text{sc}}}] \quad (5.11)$$

$T_{\mathbf{v}}$ は、並進・回転方向の目標値を同一の次元とし、かつ、正規化された目標手先速度の大きさの最大値を“1”とするための変換行列であり、行列中の $v_{\max_{\text{sc}}}$ と $\omega_{\max_{\text{sc}}}$ は、それぞれ手先並進速度、または回転速度の最大目標値である。また、 $\dot{\theta}_{\text{S1max}_{\text{sc}}}$ は、肩第一関節 θ_{S1} の最大角速度である。式(5.8)の $\hat{\mathbf{J}}_{\mathbf{A}}$ は、正規化された目標速度 $\mathbf{u}_{\mathbf{r}}$ との計算の整合性を保つために、変換行列 $\mathbf{T}_{\mathbf{v}}^{-1}$ を加えたヤコビ行列であり、式(5.12)で表される。なお、式(5.8)において、目標速度の大きさ $v_{\mathbf{r}}$ はスカラー値 \hat{b} に含まれる。

$$\hat{\mathbf{J}}_{\mathbf{A}} = \mathbf{T}_{\mathbf{v}}^{-1} \mathbf{J}_{\mathbf{A}} \quad (5.12)$$

式(5.8)の $(\text{adj} \hat{\mathbf{J}}_{\mathbf{A}}) \hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{r}}$ の計算には、1)余因子行列を計算する方法と、2)列拡張ヤコビ行列の零空間ベクトルを利用する方法とがあり、両者とも同一の結果が得られることから、本論文ではプログラムが記述し易い零空間ベクトルを用いた。列拡張ヤコビ行列 $\mathbf{H}_{\mathbf{p}}$ の零空間ベクトル $\mathbf{n}_{\mathbf{H}}$ による $(\text{adj} \hat{\mathbf{J}}_{\mathbf{A}}) \hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{r}}$ の計算を式(5.13)~(5.14)に示す。

$$(-1)^n (\text{adj} \hat{\mathbf{J}}_{\mathbf{A}}) \hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{r}} = \mathbf{n}_{\mathbf{H}} = [C_1, C_2, \dots, C_n]^T \quad (5.13)$$

$$\mathbf{C}_p = (-1)^{p+1} |\mathbf{H}_p| \quad (p = 1, 2, \dots, n) \quad (5.14)$$

ここで、行列 $\mathbf{H}_{\mathbf{p}}$ は、式(5.15)で定義される列拡張行列 \mathbf{H} から列 p を除いた行列である。

$$\mathbf{H} = [\hat{\mathbf{J}}_{\mathbf{A}}, -\hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{r}}] \quad (5.15)$$

また、 n は拡張ヤコビ行列の列数、すなわちアームの関節数と等しいことから、PA10アームでは7つの行列値 $|\mathbf{H}_1| \sim |\mathbf{H}_7|$ を計算することで、 $(\text{adj} \hat{\mathbf{J}}_{\mathbf{A}}) \hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{r}}$ を求めることができる。

符号と拡大係数の決定

目標手先速度空間から関節角速度空間に変換する際の符号 σ は式(5.16)により決定する.

$$\sigma = \text{sgn}(|\hat{\mathbf{J}}_{\mathbf{A}}|) \quad (5.16)$$

特異点を通過することで σ の符号は変化するため, 本来は式(5.16)を常に計算して符号を決定するが, 本論文では特異点を通過させる運動は行わないことから, σ は一定値を用いることとした.

また, 拡大係数 \hat{b} の大きさは可操作性楕円体の半径に基づき決定する. 式(5.17)に拡大係数 \hat{b} の計算式を示す.

$$\hat{b} = \begin{cases} \dot{\theta}_{\max} K_{\text{sc}} \frac{\hat{v}_r}{\|(\text{adj} \hat{\mathbf{J}}_{\mathbf{A}}) \hat{\mathbf{u}}_r\|} & (\text{if } \|(\text{adj} \hat{\mathbf{J}}_{\mathbf{A}}) \hat{\mathbf{u}}_r\| > 1) \\ \dot{\theta}_{\max} K_{\text{sc}} \hat{v}_r & (\text{if } \|(\text{adj} \hat{\mathbf{J}}_{\mathbf{A}}) \hat{\mathbf{u}}_r\| \leq 1) \end{cases} \quad (5.17)$$

ここで, $\dot{\theta}_{\max}$ は, 関節角速度ノルムの最大値であり, 特異点に接近した際の関節角速度の最大値を決定づける値である. また, K_{sc} は本論文で新たに導入したパラメータであり, この値を実験的に調整することで, 可能な限り広い領域で速く動作するように工夫している. 式(5.17)より, $\|(\text{adj} \hat{\mathbf{J}}_{\mathbf{A}}) \hat{\mathbf{u}}_r\|$ が0近傍の値の場合においても, 関節角速度を連続的に変化させるために \hat{b} は2つの式を切り替えて計算する. ただし, アーム姿勢によっては, 目標手先速度よりも大きな手先速度を発揮する関節角速度値が計算される場合があるため, 角速度指令が過大な場合は, 通常の方法の逆運動学により関節角速度を計算し直す. この際の判別式と拡大係数 \hat{b} を式(5.18)に示す.

$$\hat{b} = \frac{\hat{v}_r}{|\hat{\mathbf{J}}_{\mathbf{A}}|} \quad (\text{if } \|\hat{\mathbf{J}}_{\mathbf{A}} \dot{\boldsymbol{\theta}}\| > \hat{v}_r) \quad (5.18)$$

なお, 式(5.18)中の $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ は式(5.8)により計算した角速度であることに注意されたい.

これまでに述べた特異点適合法による速度の逆運動学の計算手順と使用したパラメータの値を図5.24のフローチャートと表に示す. なお, 文献^[73]では, 特異点の通過運動等を実現するための分岐とフラグ処理もあるが, 本

論文ではこれらの運動は行わないため，特異点近傍で減速するための計算のみ導入した．

図5.25に通常の方法の逆運動学のみでのアーム制御と，特異点適合法を用いた場合の動作の様子を示す．同図左に示すように，通常の方法の逆運動学を用いた場合，特異点の近傍では手先ベクトルの正確な制御が不能になるが，同図右に示すように，特異点適合法を用いることで，手先ベクトルの方向は維持したまま，減速することが可能になり，安定した動作が可能となった．

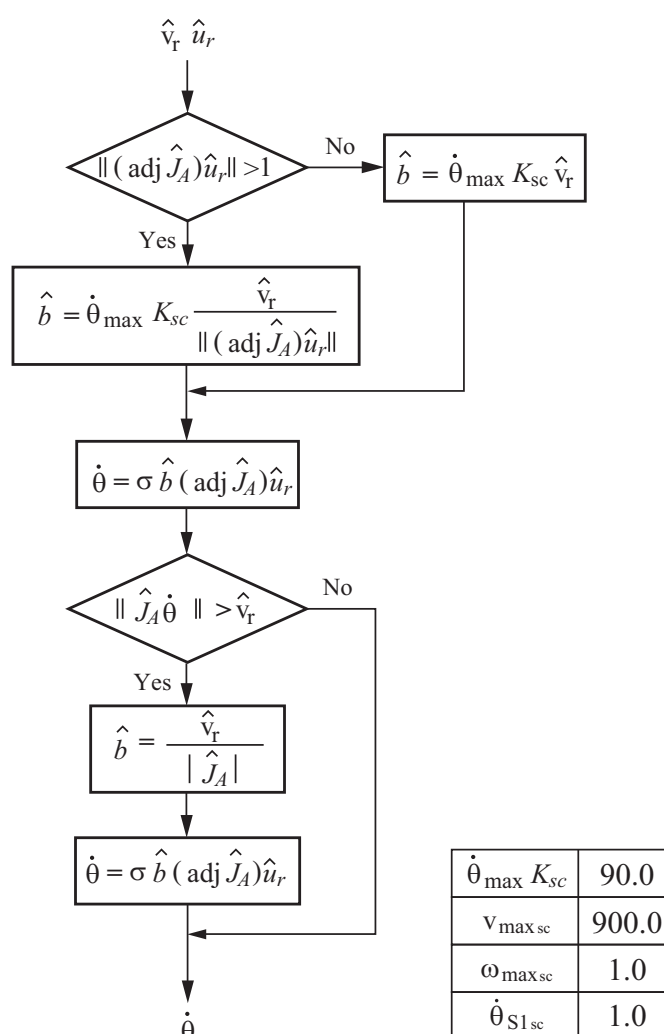
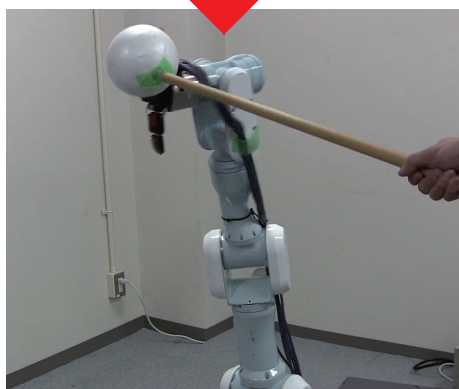
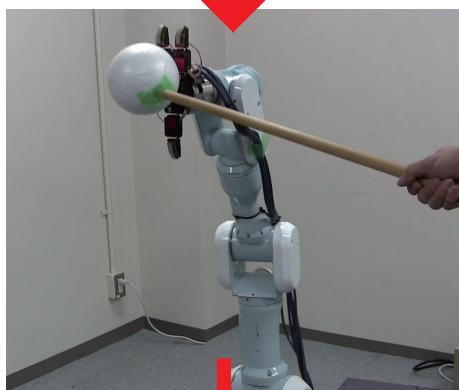
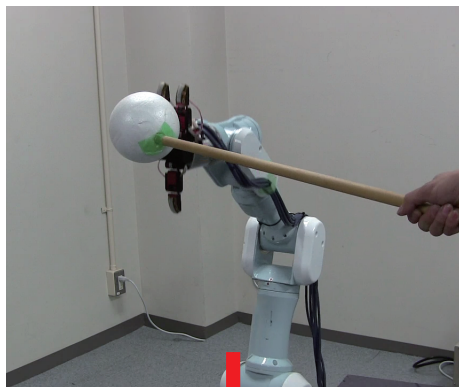


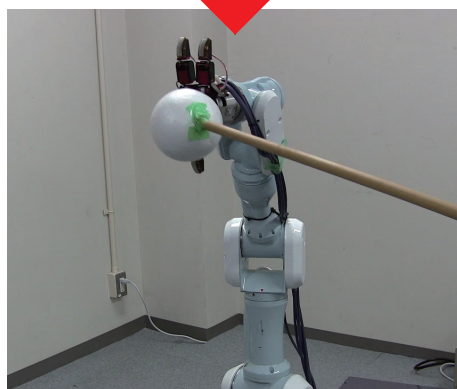
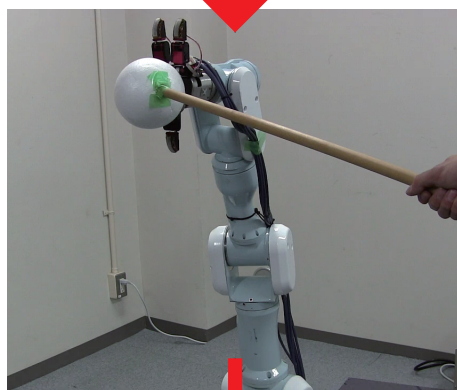
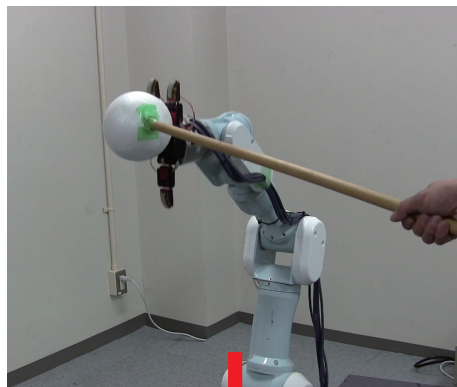
Fig. 5.24 Joint angular velocity calculation algorithm based on singularity consistent method

Natural inverse kinematic of velocity



Excessive angle velocities occurs near singularity.

Singularity consistent method



The angle velocities are slowed down near singularity.

Fig. 5.25 (Left) Arm tip velocity control by normal inverse kinematics, (Right) Arm tip velocity control by using singularity consistent method

5.8 まとめ

本章では，近接覚に基づきハンドとアームを高速に制御するための統合制御システムを構築した．センサ出力のサンプリングやハンドとアームの制御は，一台の制御器dSPACEにより一括して行われる．センサ値のサンプリング周期は0.1msであり，ハンドとアームの制御周期は5.0msと高速であるため，応答が良好なセンサフィードバック制御を実現できる．このことは，以降の章で述べる近接覚に基づく反射型制御の応答速度を早くする上で重要である．

近接覚センサの出力はアンプ回路とフィルタ回路を介してノイズがカットされ，またセンサLEDの点灯制御により，センサ間での光の干渉が生じないようにした．また，ハンドの関節角度制御，アームの関節，手先速度・位置制御系をdSPACE上に構築した．さらに，アームの速度の逆運動学計算の際に，特異点適合法を用いることで，アーム姿勢が特異点の近傍であるときも，手先方向は維持したまま減速することが可能となり，安定した動作が可能となった．これらのプログラムは全てMatlab/Simulinkを用いて記述されており，ブロック線図ベースの直感的に理解しやすいものとなっている．また，センサ系，ハンド系，アーム系と機能ごとにブロックを構成してあるため，複数の研究メンバーでのプログラムの共有，保守，管理が容易であり，今後の研究開発速度の向上が期待できる．

第6章

プリグラスプ制御

本章では，近接覚センサの出力を基に，物体形状に倣ってハンド指先配置を調整するための反射型制御を導入する（図6.1赤枠部分）．この制御は，把持する前に物体形状に沿って指先位置を調整することから，“プリグラスプ制御”と呼ぶ．以降では，ハンド関節とセンサ出力の対応関係を考察した後に，プリグラスプ制御のための2種類の制御方式を提案し，実験によりその応答特性を検証する．

6.1 センサ出力と関節の対応関係

図6.2に示すように，本研究で用いるハンドは，1指あたり最大で3関節を持ち，屈曲関節 θ_2 と屈曲関節 θ_1 ，および旋回関節 θ_p で構成される．従って，指先はピッチ角とロール角，および距離の3自由度を持つ．一方，近接覚セン

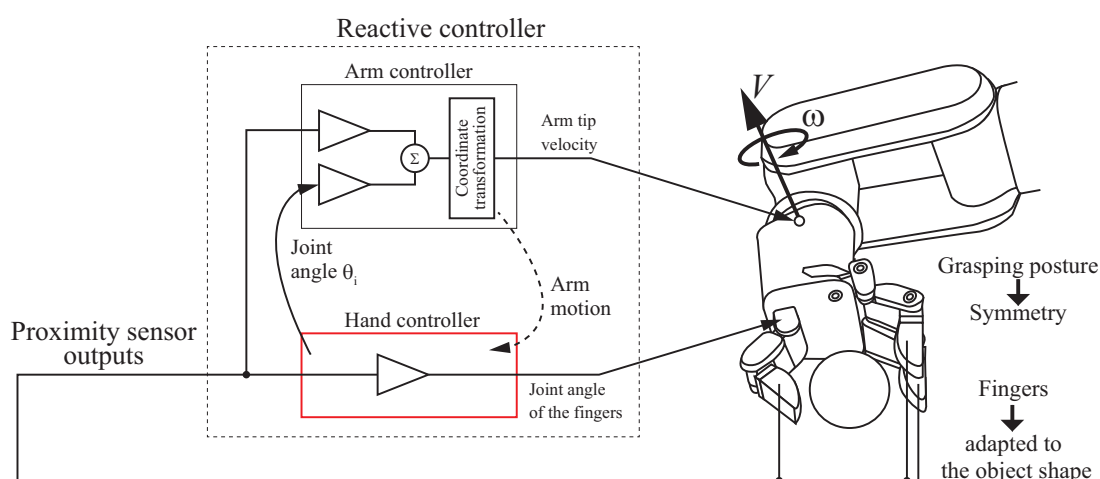


Fig. 6.1 Schematic diagram of the reactive controller of the hand

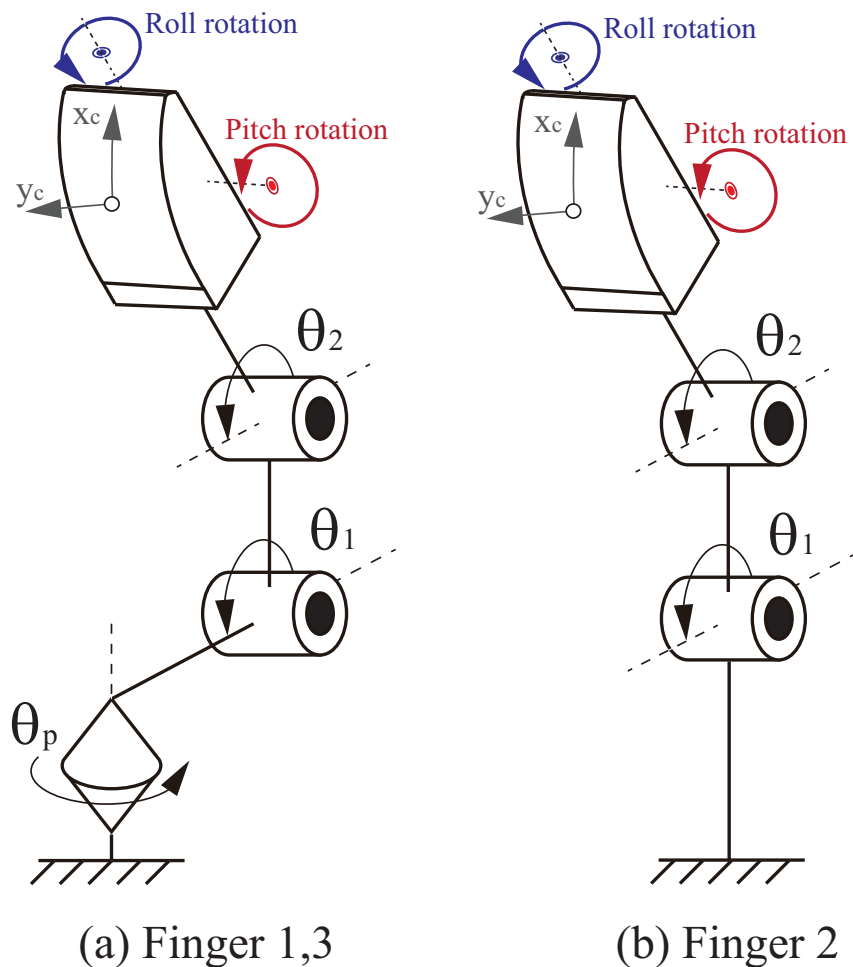


Fig. 6.2 Joint D.O.F and fingertip coordinates of each finger

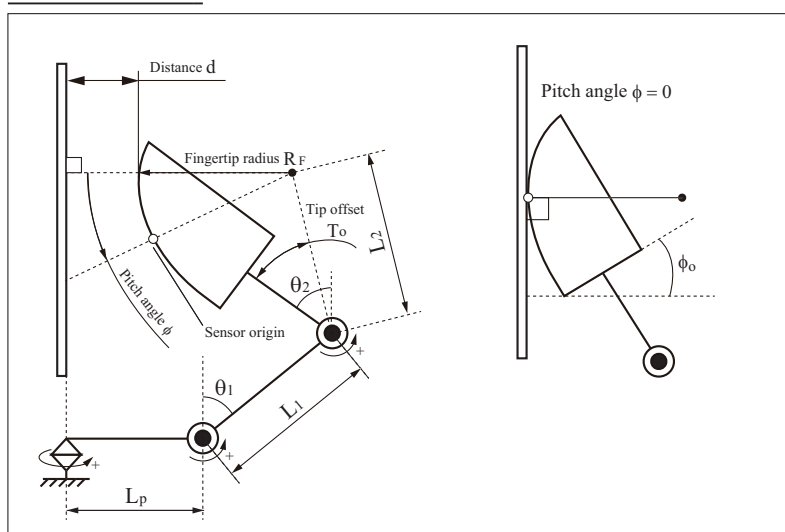
サも把持対象物面と指先との間でのピッチ角，ロール角，および距離を検出可能であるため，1つの近接覚センサからの出力で1指を制御できる．

一般的には，逆運動学により，指先座標から関節座標にセンサ出力を変換し，各指の姿勢と距離を制御するが，本論文ではセンサ出力で直接関節の角度を制御することとする．これにより，逆運動学を解く際に生じる特異点の問題を回避でき，さらに，各指や関節ごとに制御器を分散して配置可能となるため，指や関節ごとに制御系をモジュール化できるメリットがある．

6.1.1 指先姿勢・距離の変化に対する各関節の寄与度

関節とセンサ出力の割り当てを決定するために，ハンド1指あたりのヤコビ行列の成分を調べた．計算に使用した運動学モデルを図6.3に示す．旋回関節を θ_p ，屈曲関節1を θ_1 ，屈曲関節2を θ_2 とし，各関節の間，または先端までのリンク長を L_p, L_1, L_2 とした．各関節の回転方向は反時計回りが正である．対象物表面は旋回関節 θ_p の回転軸の直上にあるものとした．また，物体と指先間の距離 d を計算し易くするために，リンク L_2 の先端は指先曲面の中心とし，このためのオフセット角度を T_o とした．この指先曲面の半径は R_F であり，指先ピッチ角は ϕ ，ロール角は γ である．同図中央より， $\theta_1 + \theta_2$ がオフセット角度 ϕ_o と等しい時，ピッチ角 $\phi = 0$ である．また，同図右より $\theta_p = 0^\circ$ でロール角 $\gamma = 0^\circ$ となる．表6.1にリンク長やオフセット角度等のパラメータを示す．図6.3の静力学モデルにおいて，指先の距離 d ，ピッチ角 ϕ ，ロール角

■ Side view



■ Top view

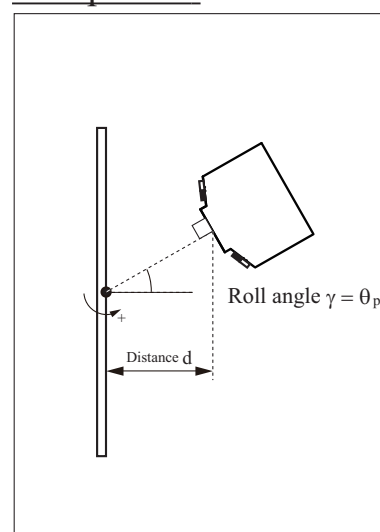


Fig. 6.3 Statics model of finger1 or 3

Table 6.1 Parameters used for analysis of Jacobian coefficient

Item	Name	Value	Unit
Length of first link	L_1	43.5	mm
Length between first joint and center of fingertip curvature	L_2	46.6	mm
Length of pivot link	L_p	35.0	mm
Radius of fingertip curvature	R_F	41.7	mm
Offset angle of fingertip curvature	T_o	47.5	°
Offset angle of pitch angle	ϕ_o	24.3	°

γ を計算するための位置の順運動学は式(6.1)~(6.3)で表される.

$$d = (L_p - L_1 \sin\theta_1 - L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2 - T_o) - R_F) \cos\theta_p \quad (6.1)$$

$$\phi = \theta_1 + \theta_2 - \phi_o \quad (6.2)$$

$$\gamma = \theta_p \quad (6.3)$$

また, 上式を微分することで, 式(6.4)に示す速度の順運動学の関係が得られる.

$$\begin{bmatrix} \dot{d} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(L_1 C_1 + L_2 C_{12})C_p & -L_2 C_{12}C_p & (-L_p + L_1 S_1 + L_2 S_{12} + R_F)S_p \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_p \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

ここで, $C_1 = \cos\theta_1$, $C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2 - T_o)$, $C_p = \cos\theta_p$, $S_p = \sin\theta_p$ である. 同式より, ロール角 γ と旋回関節 θ_p は明らかに一対一対応である. また, $S_p = 0$, かつ $C_{12} = 0$ の時, 距離 d と屈曲関節 θ_1 も一対一対応となる. ここで, $S_p = 0$ となる関節角度は $\theta_p = 0$ であり, $C_{12} = 0$ となる角度は, $\theta_1 + \theta_2 - T_o = \pm\pi/2$ であるため, 式(6.2)に代入することで, 式(6.5)が得られる.

$$\phi = \pm\frac{\pi}{2} + T_o - \phi_o \quad (6.5)$$

この関係式のうち, 関節可動範囲となるピッチ角 ϕ は -66.85° であり, この姿勢付近では, 距離の変化に対し関節 θ_1 の変化量が支配的となる.

ヤコビ行列成分変化のシミュレーション

次に，指先姿勢を変化させた際のヤコビ行列成分の変化率を調べた．なお，シミュレーションでは， $\theta_p = 0^\circ$ で固定とし， θ_1, θ_2 のみ変化させることとした．シミュレーション結果を図6.5に示す．グラフの縦軸 $|J_{12}/J_{11}|$ はヤコビ行列第1行2列目と第1行1列目の比率の絶対値である． $|J_{12}/J_{11}|$ は距離変化に対する関節 θ_2 の寄与率であるため，この値が小さいほど距離の変化に対し θ_1 が支配的となる．同図の横軸は指先ピッチ角で，グラフの各線は距離0～60mmでの結果を示している．なお，関節可動範囲からはずれるシミュレーション結果は除外してある．同図より，距離，またはピッチ角が増大するほど，係数 $|J_{12}/J_{11}|$ は増加傾向にあるが，距離0～45mmの範囲では，その値は0.6以下と比較的小さい．従って，物体近傍では，屈曲関節 θ_2 より，屈曲関節 θ_1 の方が，距離変化への寄与率が大きい．

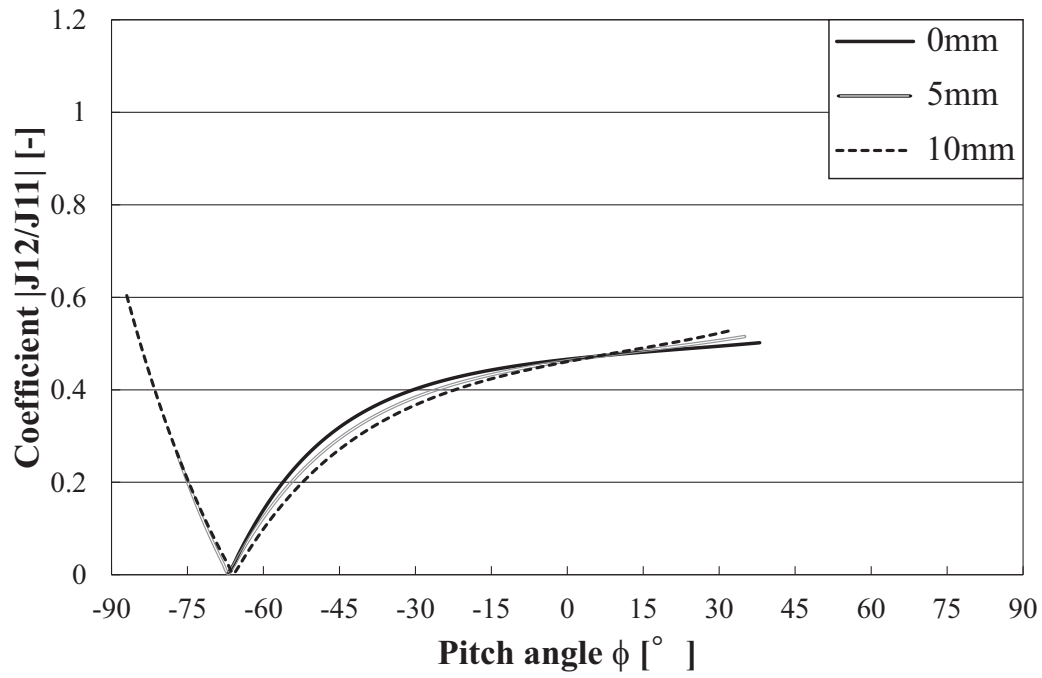


Fig. 6.4 Relation of pitch angle ϕ and coefficient of jacobian J_{12}/J_{11} (distance $d = 0 \sim 10$ mm)

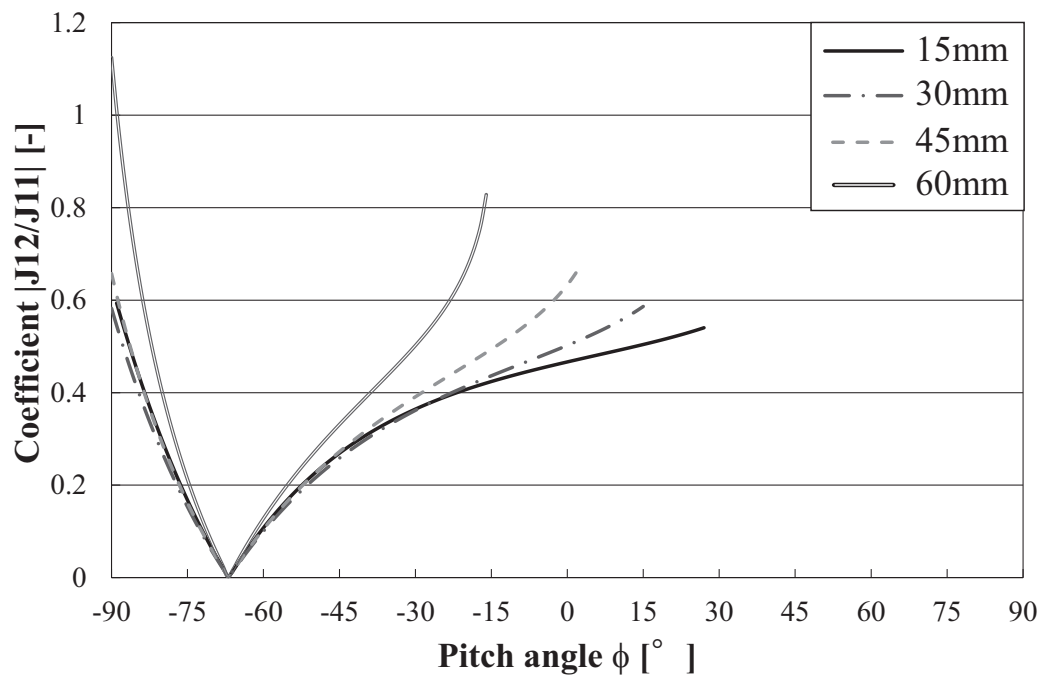


Fig. 6.5 Relation of pitch angle ϕ and coefficient of jacobian J_{12}/J_{11} (distance $d = 15 \sim 60$ mm)

以上のヤコビ行列係数の特徴より，旋回関節 $\theta_p = 0^\circ$ ，ピッチ角 $\phi = -66.85^\circ$ で，かつ物体の近傍においては，式(6.6)で指先座標と関節座標との対応関係を近似できる．

$$\begin{bmatrix} \dot{d} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_1 C_1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_p \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

式(6.6)の左辺を関節角速度 $\dot{\theta}_1$ ， $\dot{\theta}_2$ ， $\dot{\theta}_p$ とし，これらを角速度制御系への指令値 $\dot{\theta}_{1\text{-ref}}$ ， $\dot{\theta}_{2\text{-ref}}$ ， $\dot{\theta}_{p\text{-ref}}$ とすると，角速度制御式(6.7)~(6.9)が得られる．

$$\dot{\theta}_{1\text{-ref}} = -\frac{1}{L_1 C_1} \dot{d} \quad (6.7)$$

$$\dot{\theta}_{2\text{-ref}} = \dot{\phi} - \dot{\theta}_{1\text{-ref}} \quad (6.8)$$

$$\dot{\theta}_{p\text{-ref}} = \dot{\gamma} \quad (6.9)$$

ここで，距離 d に関するセンサ出力は I_{all} であり，ピッチ角 ϕ は位置出力 x_c ，ロール角 γ は位置出力 y_c がそれぞれ対応する．そこで， \dot{d} ， $\dot{\phi}$ ， $\dot{\gamma}$ のセンサフィードバック制御式を式(6.10)~(6.12)とする．

$$\dot{d} = K_1(I_{\text{all}} - I_{\text{ref}}) \quad (6.10)$$

$$\dot{\phi} = K_2(x_c) \quad (6.11)$$

$$\dot{\gamma} = K_3(y_c) \quad (6.12)$$

K_1 と K_2 ， K_3 は適当なゲインであり，全て定数である．また， I_{ref} は距離出力の目標値であり，あらかじめ実験データから距離 d_{ref} での距離出力 I_{all} を I_{ref} として設定する．これらの制御式は， $I_{\text{all}} = I_{\text{ref}}$ ， $x_c = 0$ ， $y_c = 0$ が平衡点であり，物体と指先との間を一定距離 d_{ref} とし，ピッチ角 $\phi = 0$ ，ロール角 $\gamma = 0$ の正対した姿勢に調整する．これらを式(6.7)~(6.9)に代入し，式(6.7)の $L_1 C_1$ を一定値で近似できると仮定し，ゲイン K_1 に含めることで，近接覚センサ出力に基づく角速度制御式(6.13)~(6.15)が得られる．

$$\dot{\theta}_{1\text{-ref}} = K_1(I_{\text{ref}} - I_{\text{all}}) \quad (6.13)$$

$$\dot{\theta}_{2\text{-ref}} = K_2(x_c) - K_1(I_{\text{all}} - I_{\text{ref}}) \quad (6.14)$$

$$\dot{\theta}_{p\text{-ref}} = K_3(y_c) \quad (6.15)$$

またこのほか，物体に接近する途中経路でのピッチ角を維持する必要がない場合，屈曲関節 θ_2 の制御は位置出力 x_c のみでも可能であると考えた．この場合の角速度制御式を式(6.16)~(6.18)に示す．

$$\dot{\theta}_{1-\text{ref}} = K_1(I_{\text{ref}} - I_{\text{all}}) \quad (6.16)$$

$$\dot{\theta}_{2-\text{ref}} = K_2(x_c) \quad (6.17)$$

$$\dot{\theta}_{p-\text{ref}} = K_3(y_c) \quad (6.18)$$

以降では，式(6.13)~(6.15)に基づく制御を“干渉制御方式”と呼び，式(6.16)~(6.18)を“独立制御方式”と呼ぶ．

これらの制御方式の指令値は角速度であるが，ハンドの制御ではトルク制御の他，トルクベースの関節角度制御が用いられることが多い．そこで，本論文では角速度制御式を一回積分し，各関節の角度指令値 $\theta_{1-\text{ref}}$, $\theta_{2-\text{ref}}$, $\theta_{p-\text{ref}}$ を生成することとする．

6.1.2 干渉制御方式

式(6.13)～式(6.15)を積分し，制御開始時の初期角度を $\theta_{1\text{-initial}}$, $\theta_{2\text{-initial}}$, $\theta_{p\text{-initial}}$ とすると，初期条件は $\theta_{1\text{-ref}}(0) = \theta_{1\text{-initial}}$, $\theta_{2\text{-ref}}(0) = \theta_{2\text{-initial}}$, $\theta_{p\text{-ref}}(0) = \theta_{p\text{-initial}}$ であり，これらを代入することで，角度制御式(6.19)～(6.21)が得られる．

$$\theta_{1\text{-ref}} = \theta_{1\text{-initial}} + K_1 \int (I_{\text{ref}} - I_{\text{all}}) dt \quad (6.19)$$

$$\theta_{2\text{-ref}} = \theta_{2\text{-initial}} + K_2 \int (x_c) dt - K_1 \int (I_{\text{ref}} - I_{\text{all}}) dt \quad (6.20)$$

$$\theta_{p\text{-ref}} = \theta_{p\text{-initial}} + K_3 \int (y_c) dt \quad (6.21)$$

ブロック図6.6に示すように，式(6.19)～(6.21)で生成した角度指令値と現在角度の偏差が“0”となるようにPID制御する．この制御方式では，屈曲関節2への指令値 $\theta_{2\text{-ref}}$ は，屈曲関節 $\theta_{1\text{-ref}}$ の角度変化分を減算する形となっており，これにより，位置出力 $x_c = 0$ の際は指先のピッチ角が一定に保たれる．

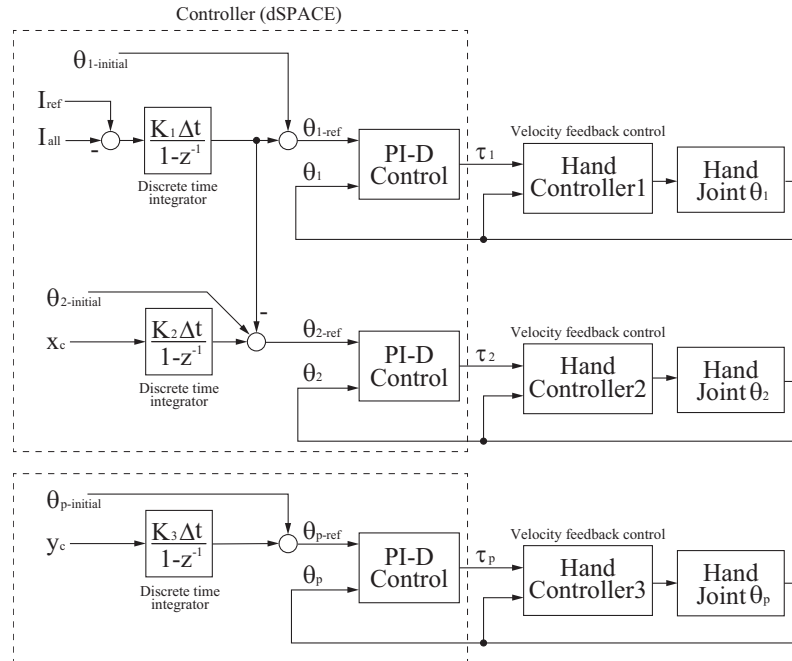


Fig. 6.6 Control block diagram of interference control method

6.1.3 独立制御方式

先ほどと同様に，式(6.16)～(6.18)を積分し，初期条件を代入することで，角度制御式(6.22)～(6.24)が得られる．ブロック図6.7に示す通り，干渉制御方式と同様に，式(6.22)～(6.24)による角度指令値をPID制御による角度制御系への入力値とする．

独立制御方式では，指の関節($\theta_1, \theta_2, \theta_p$)に対し，一対一対応でセンサ出力(I_{all}, x_c, y_c)を割り当てることで，1指の制御を3関節の制御に分解する．干渉制御方式と比べて，ピッチ角の応答特性が悪くなることが予想されるが，各制御式が独立しているため，分散的な制御系を構築できるメリットがある．

$$\theta_{1\text{-ref}} = \theta_{1\text{-initial}} + K_1 \int (I_{\text{ref}} - I_{\text{all}}) dt \quad (6.22)$$

$$\theta_{2\text{-ref}} = \theta_{2\text{-initial}} + K_2 \int (x_c) dt \quad (6.23)$$

$$\theta_{p\text{-ref}} = \theta_{p\text{-initial}} + K_3 \int (y_c) dt \quad (6.24)$$

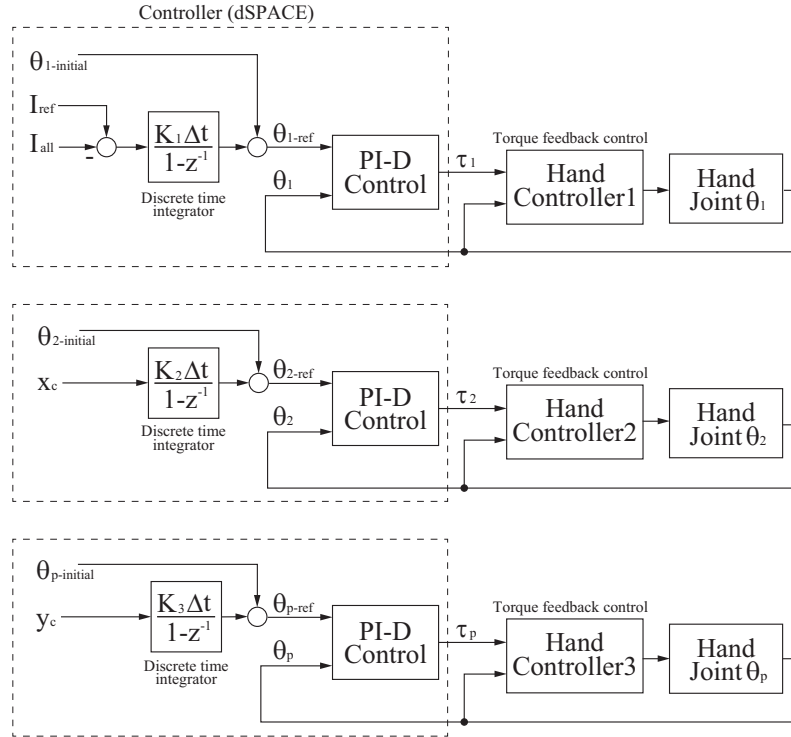


Fig. 6.7 Control block diagram of independent control method

6.2 2種類の制御方式の応答特性評価実験

干渉制御方式と独立制御方式の応答特性の違いを実験により検証した。実験装置を図6.8に示す。ハンド掌の直下に回転ステージ上に固定した対象物を設置してある。対象物は指先より大きな標準反射板(Kodak gray card 90% white)とした。物体と指先間の距離 d 、ピッチ角 ϕ 、ロール角 γ は図6.9のように定義する。距離 d は指先表面から物体面までの距離とし、ピッチ角 ϕ 、ロール角 γ は物体面と指先が正対する姿勢を 0° とする角度である。

フィードバックゲイン K_1, K_2, K_3 と目標値 I_{ref} の設定

実験では、対象物表面の反射率は既知とし、制御式の目標値 I_{ref} は、距離5mmでの I_{all} 値5.76mAとした。また、制御式のゲイン K_1, K_2, K_3 については、各関節の最大角速度とセンサ出力の偏差の比から決定した。

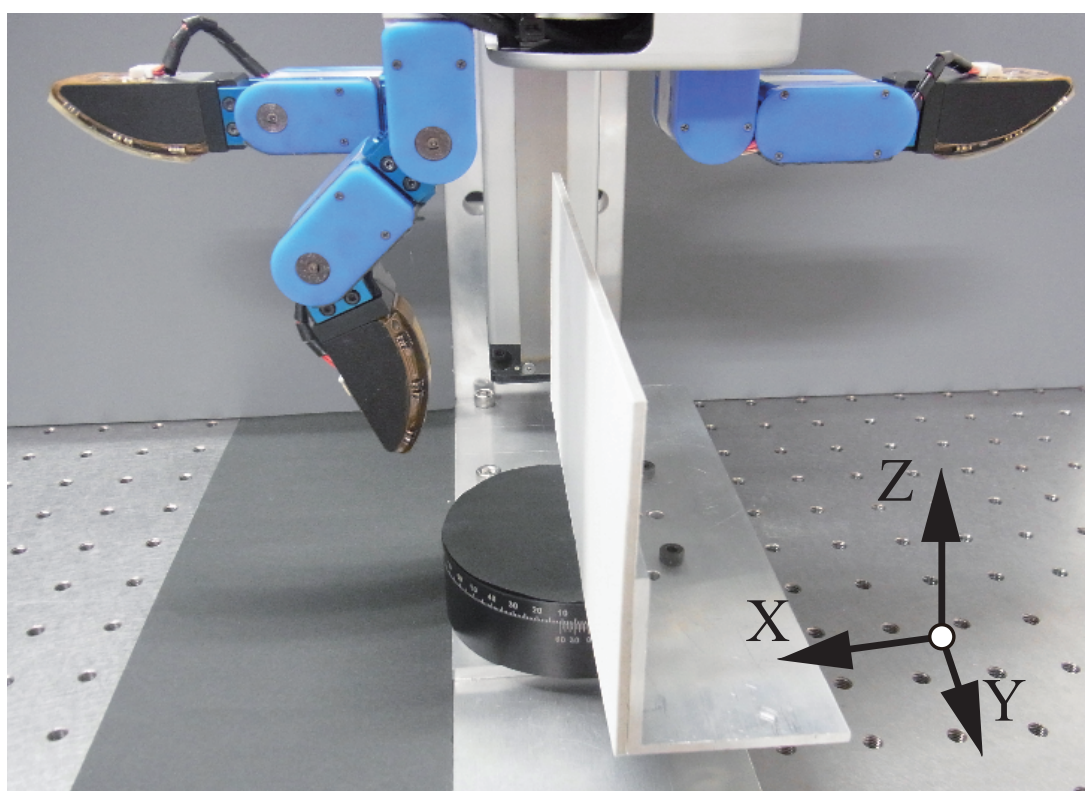
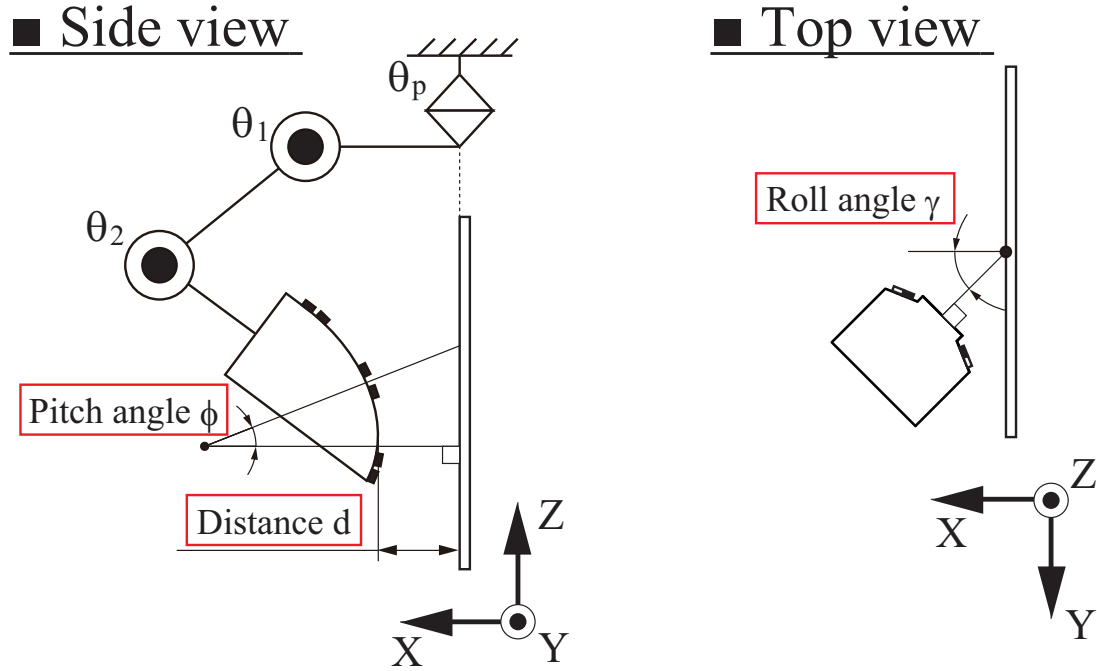


Fig. 6.8 Experimental apparatus for pre-grasp

Fig. 6.9 Definition of pitch angle ϕ , roll angle γ and distance d

このゲイン計算式を式(6.25)~(6.27)に示す.

$$K_1 = \frac{\max(I_{\text{ref}} - I_{\text{all}})}{\dot{\theta}_{1\text{max}}} \quad (6.25)$$

$$K_2 = \frac{\max(x_c)}{\dot{\theta}_{2\text{max}}} \quad (6.26)$$

$$K_3 = \frac{\max(y_c)}{\dot{\theta}_{p\text{max}}} \quad (6.27)$$

ここで, $\dot{\theta}_{1\text{max}}$, $\dot{\theta}_{2\text{max}}$, $\dot{\theta}_{p\text{max}}$ は各関節の最大角速度であり, $\max(x_c)$, $\max(y_c)$, $\max(I_{\text{ref}} - I_{\text{all}})$ はセンサ出力の最大偏差である. 式(6.25)~(6.27)に表6.2のパラメータを代入することで, $K_1 = 0.5138$, $K_2 = 11.62$, $K_3 = 20.93$ が得られる. 以上より, 実験では表6.3に示す目標値 I_{ref} とゲイン K_1, K_2, K_3 を用いることとした.

Table 6.2 Parameters used for gain setting of control equations

Item	Symbol	Value	Unit
Reference value of I_{all}	I_{ref}	5.76	mA
Maximum value of I_{all}	$I_{\text{all}_{\text{max}}}$	19.21	mA
Maximum error of I_{all}	$\max(I_{\text{all}} - I_{\text{ref}})$	13.45	mA
Maximum error of x_c	$\max(x_c)$	1.0	-
Maximum error of y_c	$\max(y_c)$	1.0	-
Maximum speed of 1st. flexion joint	$\dot{\theta}_{1\text{max}}$	6.91	rad/s
Maximum speed of 2nd. flexion joint	$\dot{\theta}_{2\text{max}}$	11.62	rad/s
Maximum speed of pivot joint	$\dot{\theta}_{\text{pmax}}$	20.93	rad/s

Table 6.3 Gain and reference value of control equations

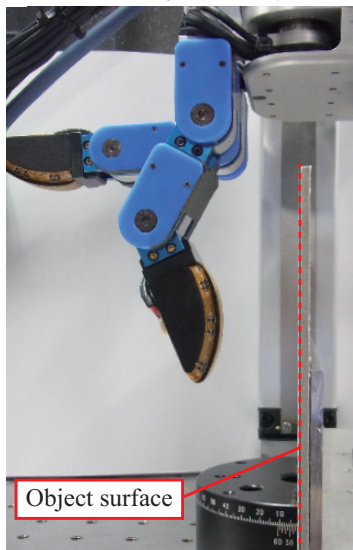
Item	Symbol	Value	Unit
Reference value of I_{all}	I_{ref}	5.76	mA
Gain of 1st flexion joint	K_1	0.5138	-
Gain of 2nd flexion joint	K_2	11.62	-
Gain of pivot joint	K_3	20.93	-

指先の初期位置

物体近傍において、把持対象物の表面と指先との間に姿勢や距離の誤差が生じている場合を想定し、図6.10に示す3種類の初期位置で実験を行った。初期位置1は距離 $d = 30\text{ mm}$ 、ピッチ角 $\phi = 0^\circ$ 、ロール角 $\gamma = 0^\circ$ であり、初期位置2は距離 $d = 30\text{ mm}$ 、ピッチ角 $\phi = -45^\circ$ 、ロール角 $\gamma = 0^\circ$ 、初期位置3は距離 $d = 10\text{ mm}$ 、ピッチ角 $\phi = 30^\circ$ 、ロール角 $\gamma = 0^\circ$ である。ここでは、屈曲関節 θ_2 の制御式の違いによる効果を確認することが目的であるため、ロール角 γ は 0° とした。また、ハンド関節の可動域内の指先位置とするために、初期位置3のみ距離 $d = 10\text{ mm}$ とした。これらの初期位置で2種類の制御方式をそれぞれ実行し、物体と指先の間での距離とピッチ角の収束時間、および応答特性の違いを確認した。

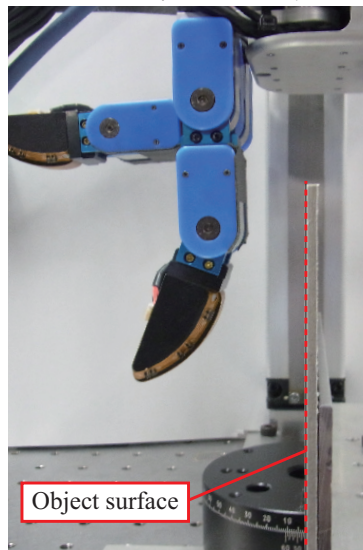
■ Initial position 1

$d = 30\text{ mm}$, $\phi = 0^\circ$, $\gamma = 0^\circ$



■ Initial position 2

$d = 30\text{ mm}$, $\phi = -45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$



■ Initial position 3

$d = 10\text{ mm}$, $\phi = 30^\circ$, $\gamma = 0^\circ$

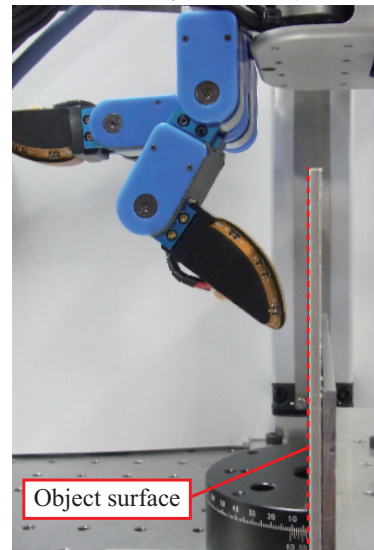


Fig. 6.10 Three initial positions of finger

初期位置1での実験結果

独立制御方式を用いて、初期位置1から誤差修正を行った際の実験結果を図6.11・6.12に示す。図6.11（上段）は、制御を開始してからの物体と指先間の距離の変化であり、同図（下段）は、ピッチ角とロール角の変化をプロットしてある。同様に、図6.12（上段）は距離出力 I_{all} であり、同図（下段）は位置出力 x_c, y_c である。図6.11・6.12より、時間経過に従って位置出力 x_c, y_c, I_{all} は目標値に収束し、これに伴って、目標距離 $d = 5\text{mm}$ 、目標姿勢 $\phi = 0^\circ$ に収束している。距離が目標値に収束するまでの90%収束時間は、 0.27s であった。図6.11（下段）より、ピッチ角は一度、 10° まで増加した後、目標距離に接近するにつれて、緩やかに目標姿勢 $\phi = 0^\circ$ に収束している。これは、屈曲関節 θ_1 が回転したことにより、ピッチ角に一時的にずれが生じたためであると考えられる。

次に、干渉制御方式を用いて初期位置1から誤差修正を行った際の実験結果を図6.13・6.14に示す。独立制御方式での結果と同様に、時間経過に伴って、センサ出力と距離・姿勢は目標値に収束している。距離が目標値に収束するまでの90%収束時間は 0.305s であった。独立制御方式での結果と比較すると、目標距離の近傍での収束性が良く、また、ピッチ角 ϕ が目標姿勢 0° に維持されている。これは、関節 θ_1 の回転角の分、関節 θ_2 が逆転することにより、指先のピッチ角が一定に保たれる効果であると考えられる。ただし、目標距離への90%収束時間を比べると、独立制御方式で 0.27s 、干渉制御方式で 0.305s であり、ほとんど差異はない。

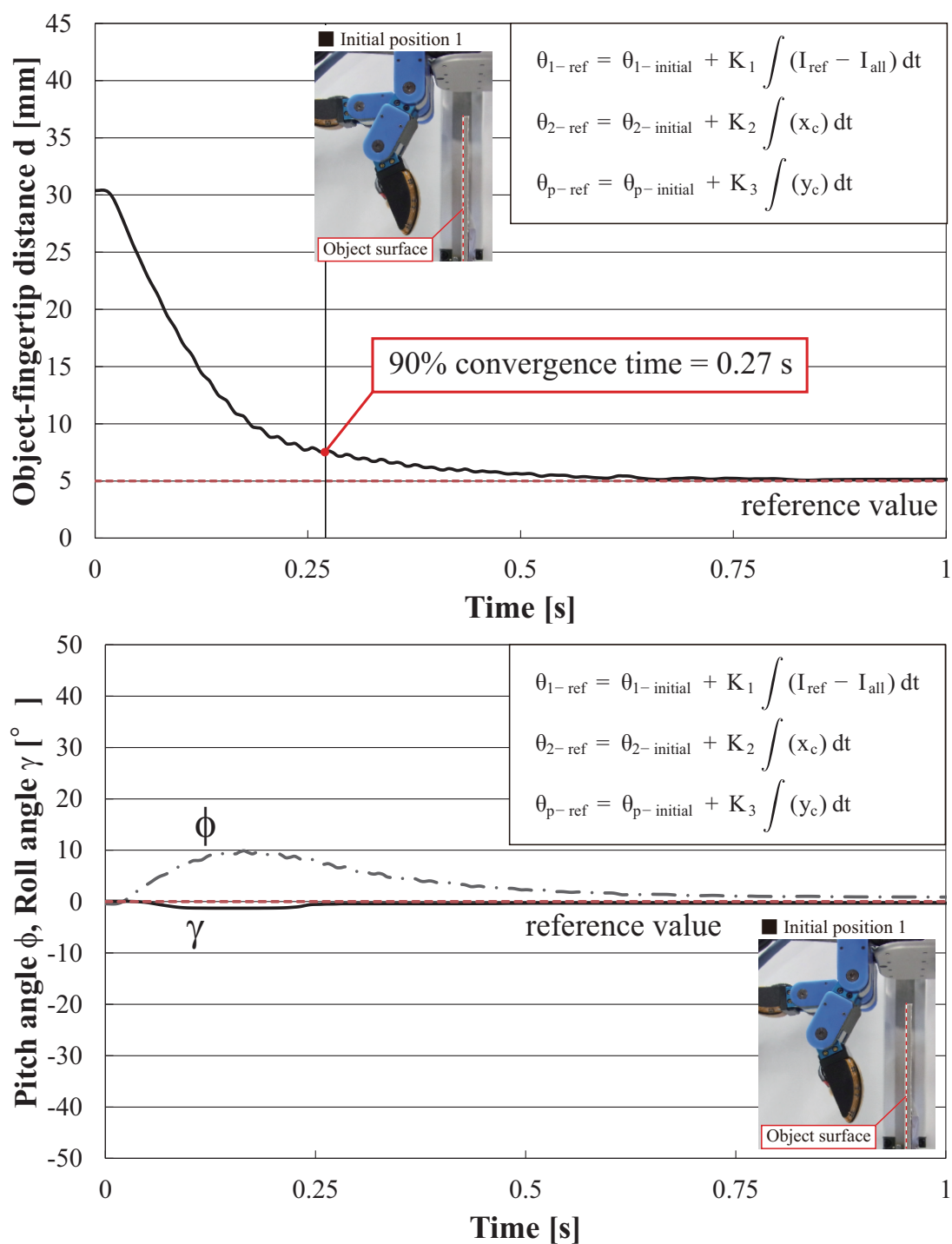


Fig. 6.11 Time change of distance and postures in independent control method (Initial position 1)

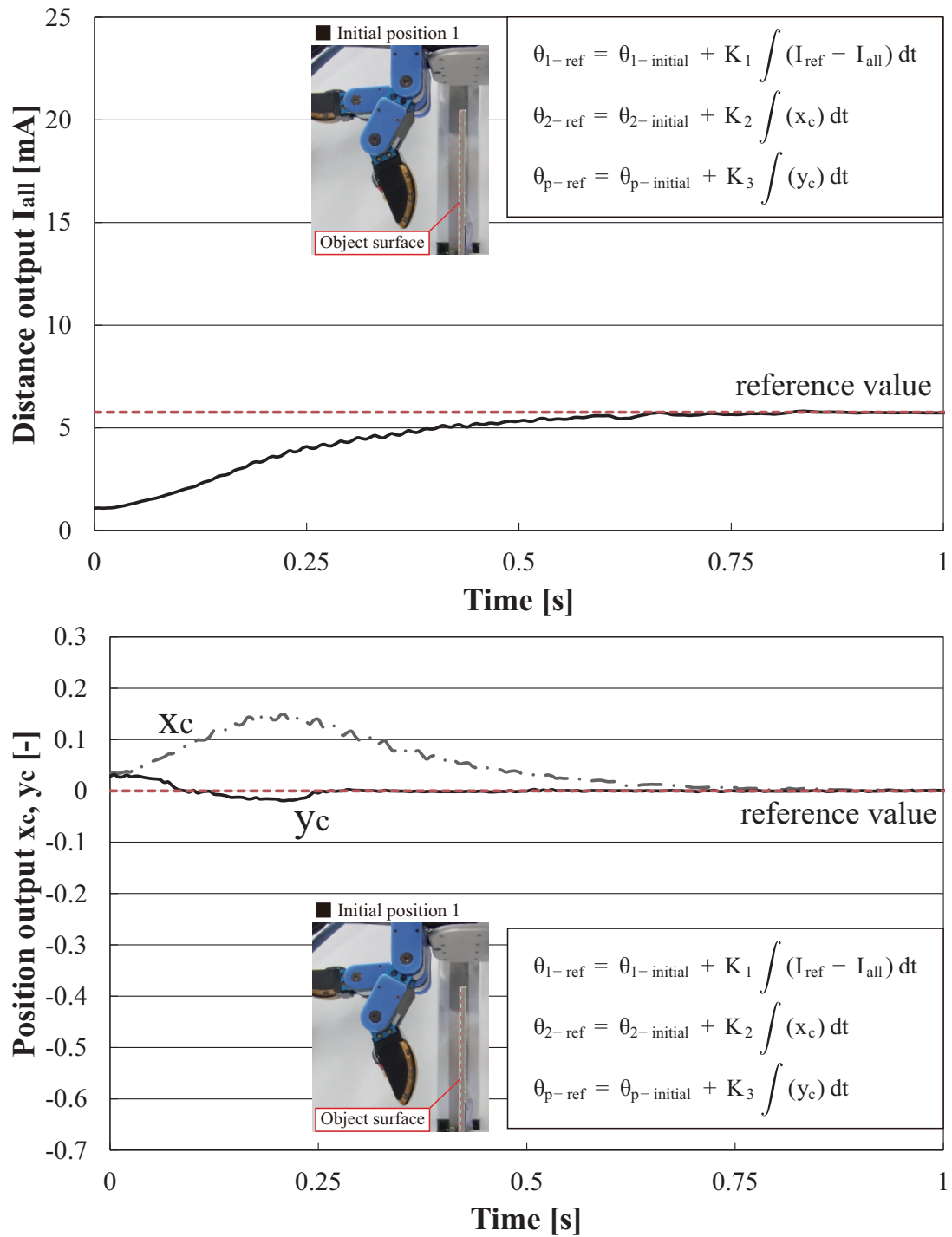


Fig. 6.12 Time change of sensor outputs in independent control method (Initial position 1)

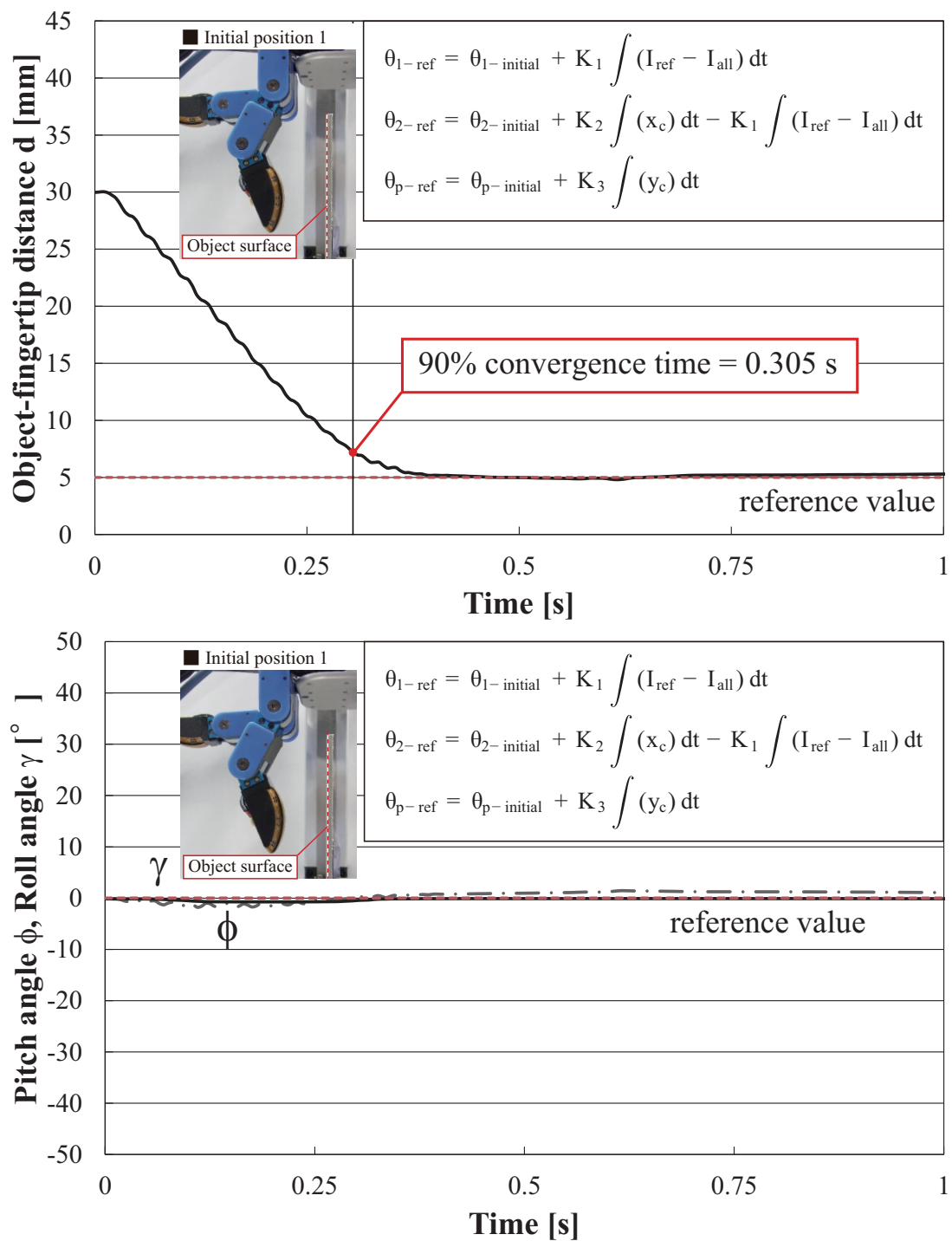


Fig. 6.13 Time change of distance and postures in interference control method (Initial position 1)

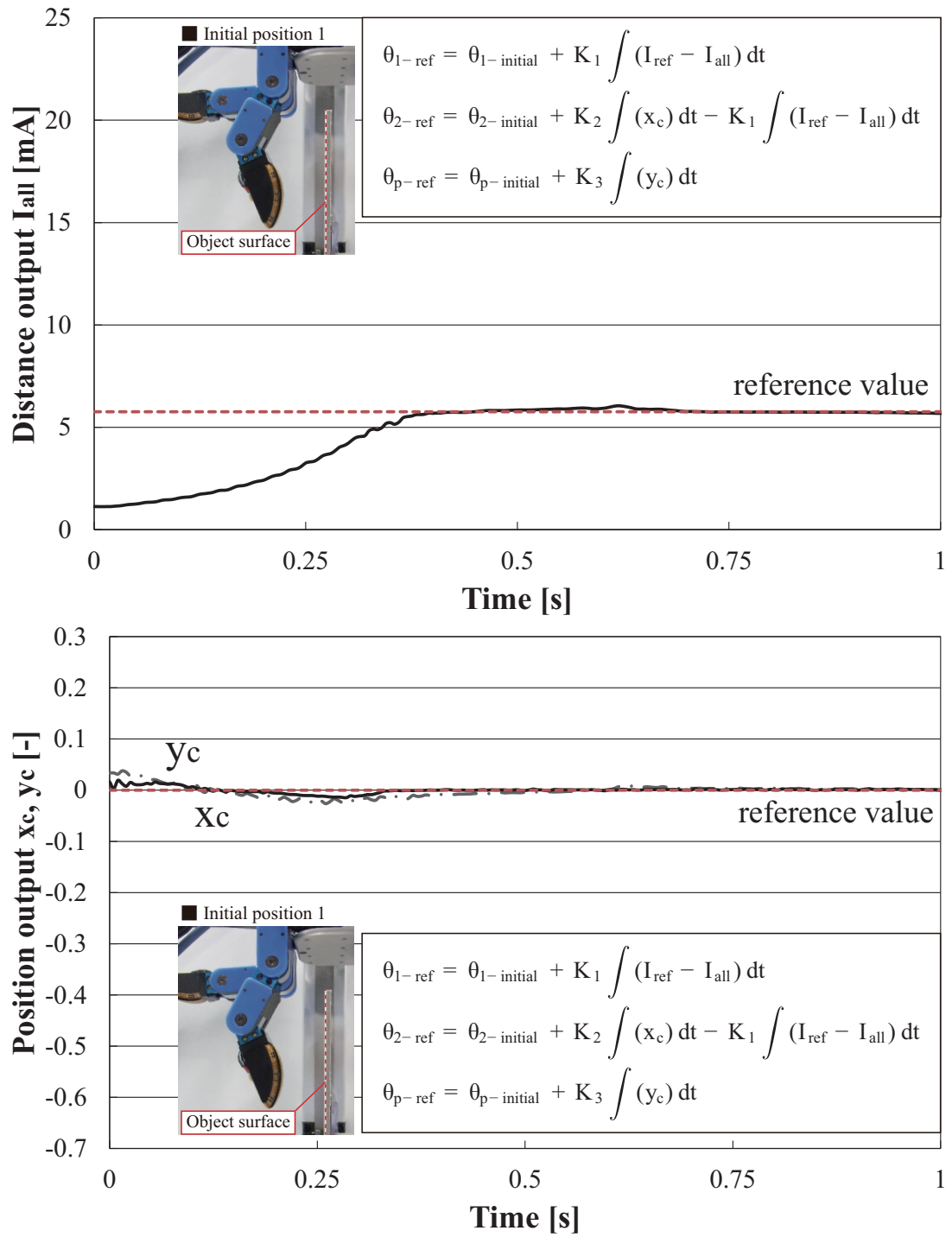


Fig. 6.14 Time change of sensor outputs in interference control method (Initial position 1)

初期位置2での実験結果

独立制御方式を用いて、初期位置2から誤差修正を行った際の実験結果を図6.11・6.12に示す。両図共に、初期位置1での結果と同様に、距離・姿勢とセンサ出力の変化をそれぞれプロットしてある。図6.11より、距離が目標値へ収束するまでの90%収束時間は0.18s、ピッチ角の収束時間も0.18sであり、比較的短い。ただし、ピッチ角 ϕ は目標値 0° に安定して収束しているものの、距離 d にはオーバーシュートが生じた。

図6.11を詳しく見ると、距離 d が目標距離5mmに達した0.135sの時点では、まだピッチ角には -12.1° の誤差があり、位置出力 x_c にも-0.3の偏差が生じている。この偏差を修正するために、屈曲関節 θ_2 が物体と接近する方向に動作した結果、距離にオーバーシュートが生じたと考えられる。目標距離の付近でピッチ角誤差が残った原因としては、位置出力 x_c の値が距離に依存する点が挙げられる。4章の傾き検出特性実験で確認した通り、位置出力 x_c は同じ傾き姿勢であっても物体との距離が離れるほどその値は減少する。このため、物体に接近するまでは関節 θ_2 によるピッチ角の修正動作が緩慢となり、目標距離の近傍でピッチ角の誤差が生じたと考えられる。

次に、干渉制御方式を用いた際の実験結果を図6.17・6.18に示す。同図より、距離の90%収束時間は0.16sであり、わずかに独立制御方式での結果より短いものの、ピッチ角の90%収束時間は0.255sであり、0.075s増加している。また、ピッチ角と距離に比較的大きなオーバーシュートが生じ、特に距離は振動的な挙動を示している。図6.17より、距離 d が目標距離5mmに達した0.17sの時点では、ピッチ角はまだ 19.4° であり、独立制御方式と比べて 7.3° 大きい誤差が生じている。目標距離の近傍で比較的大きなピッチ角誤差が残っている原因としては、干渉制御方式の指先ピッチ角を維持する働きと、位置出力 x_c の特性の2つの影響によるものと考えられる。干渉制御方式では、関節 θ_2 の動作により指先ピッチ角を維持し、かつ位置出力 x_c でピッチ角の誤差を修正する。しかしながら、物体との距離が離れている際は、位置出力 x_c を用いた傾き修正の動作速度が低下し、かつピッチ角が維持されることで、ピッチ角の誤差があまり修正されない状態となる。これにより、目標距離の近傍で

比較的大きなピッチ角の誤差が残り，急激に屈曲関節 θ_2 がこの誤差の修正動作を行うことで，大きなオーバーシュートと振動が生じたと考えられる．

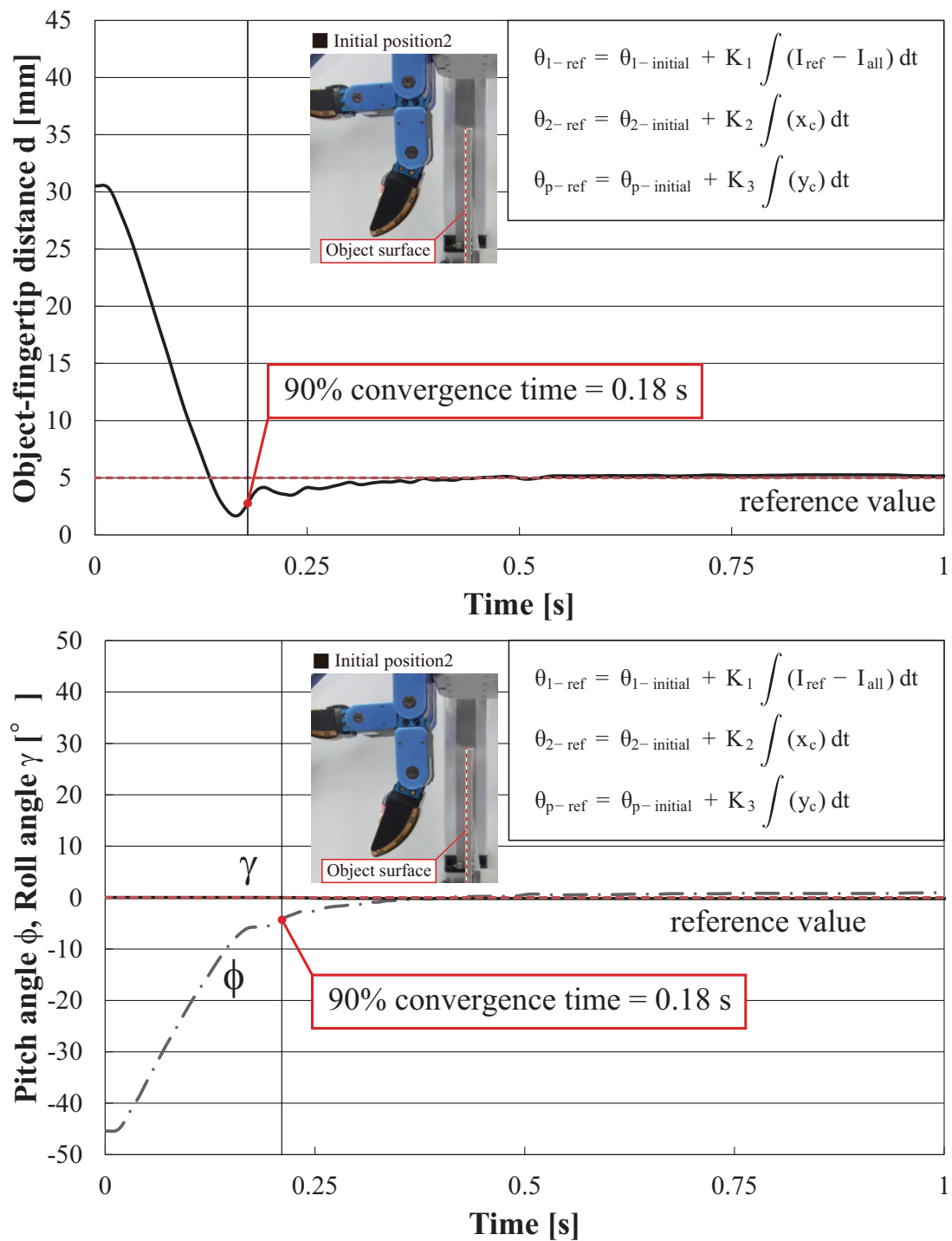


Fig. 6.15 Time change of distance and postures in independent control (Initial position 2)

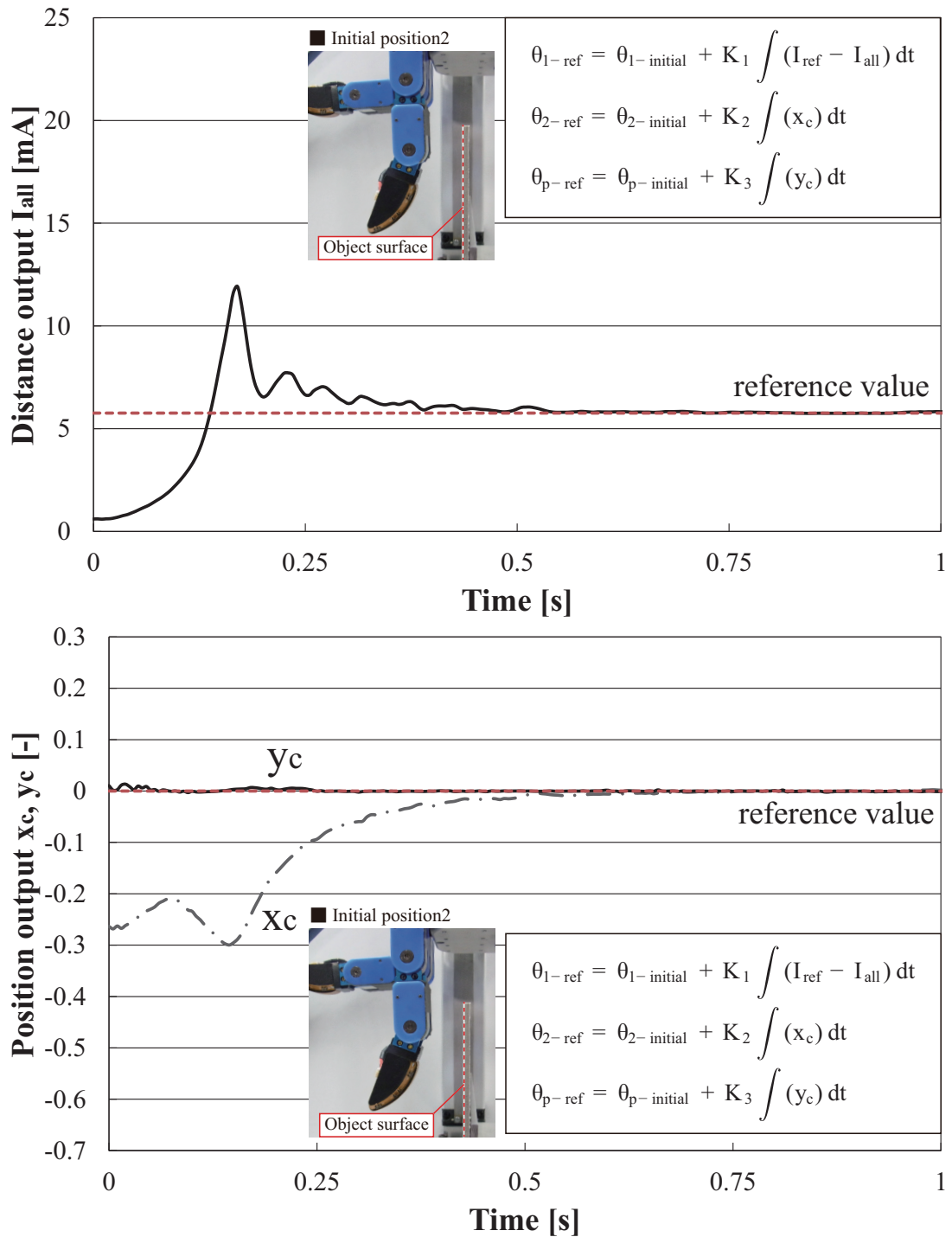


Fig. 6.16 Time change of sensor outputs in independent control (Initial position 2)

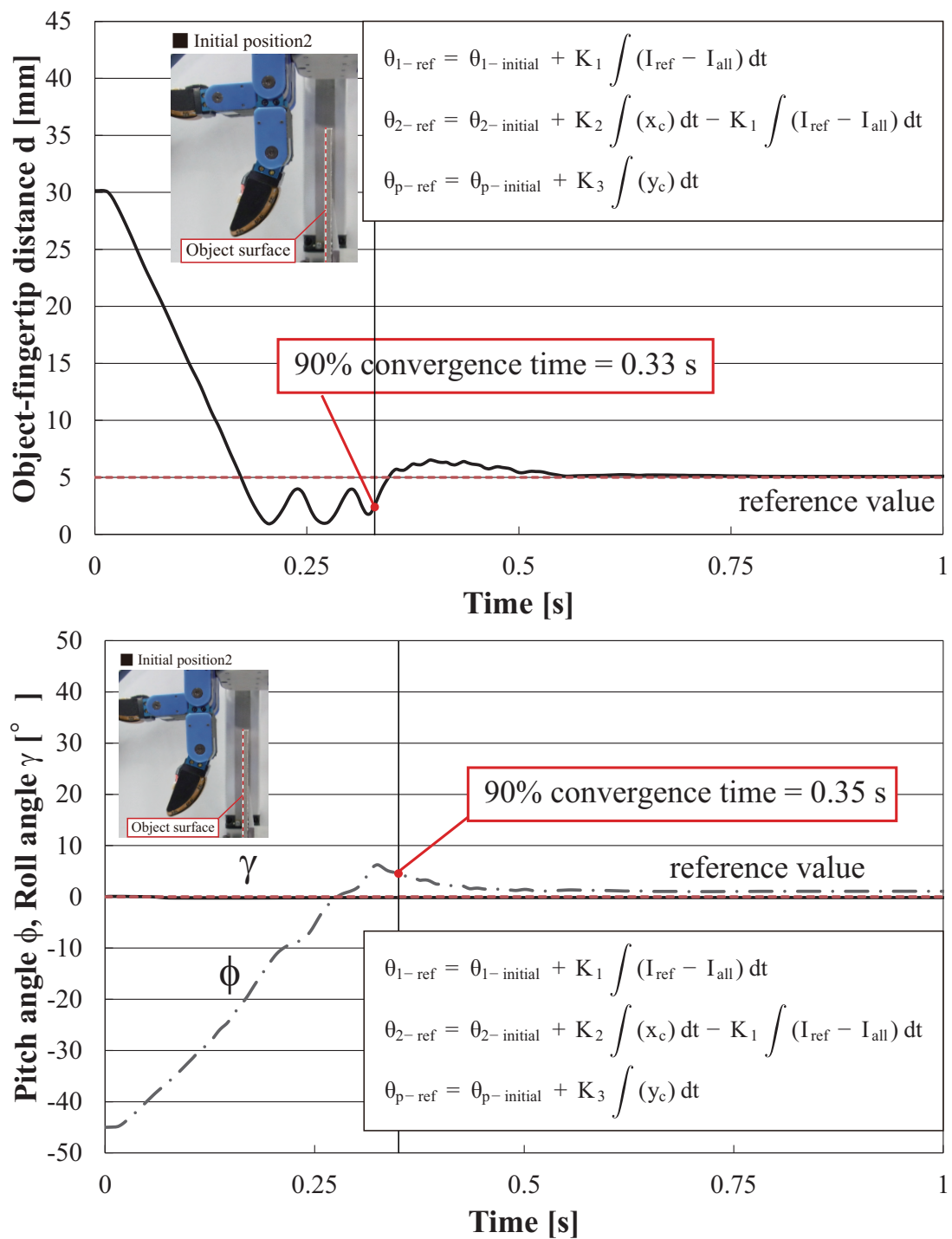


Fig. 6.17 Time change of distance and postures in interference control (Initial position 2)

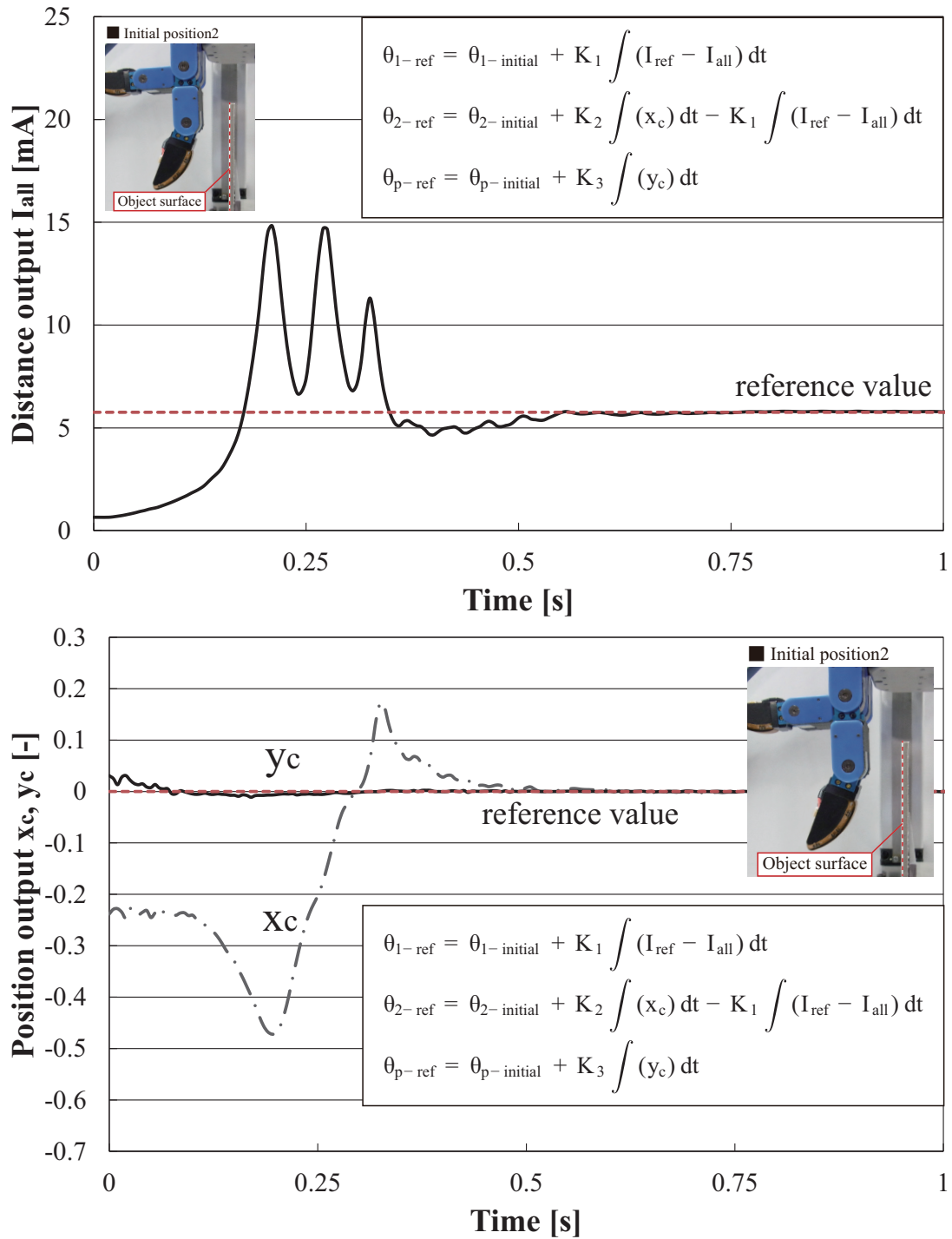


Fig. 6.18 Time change of sensor outputs in interference control method (Initial position 2)

初期位置3での実験結果

独立制御方式を用いて、初期位置3から誤差修正を行った際の実験結果を図6.19・6.20に示す。図6.19（上段）より、距離は物体から離れる軌道を通った後に緩やかに目標値に収束しており、ピッチ角もなだらかな曲線を描いて収束している。物体との距離が一度離れる軌道をとっているのは、屈曲関節 θ_2 が正方向のピッチ角誤差を修正するために、物体から遠ざかる方向に回転しているためである。距離が目標値に収束するまでの90%収束時間は0.58sであり、ピッチ角の90%収束時間は0.49sであった。次に、干渉制御方式を用いた際の実験結果を図6.21・6.22に示す。同図より、距離の90%収束時間は0.43s、ピッチ角の90%収束時間は0.245sであり、独立制御と比べて、それぞれ0.15s、0.245s短い結果となった。

2種類の制御方式の比較実験のまとめ

以上の実験結果での距離・ピッチ角の収束時間と、オーバーシュートや振動の有無をまとめた結果を表6.4に示す。表より、初期位置3においては干渉制御の方が収束時間が短く優れているが、初期位置2では独立制御の方が収束時間が短い。また、初期位置・姿勢2では、両方式とも目標距離の近傍で比較的大きなオーバーシュートが生じた他、干渉制御では振動的な挙動を示した。これは、位置出力 x_c に基づく関節 θ_2 の傾き修正動作により、物体との距離が近くなる方向に指先が移動した結果であると考えられる。

これらの実験結果から、両制御方式ともに、負方向のピッチ角誤差の修正を不得意とするものの、距離と姿勢の誤差を同時に修正可能であることを確認できた。以降では、振動的な挙動を示さなかった独立制御を基本的に用いることとし、物体に接近する途中経路でのピッチ角を維持したい場合のみ、干渉制御を用いることとする。

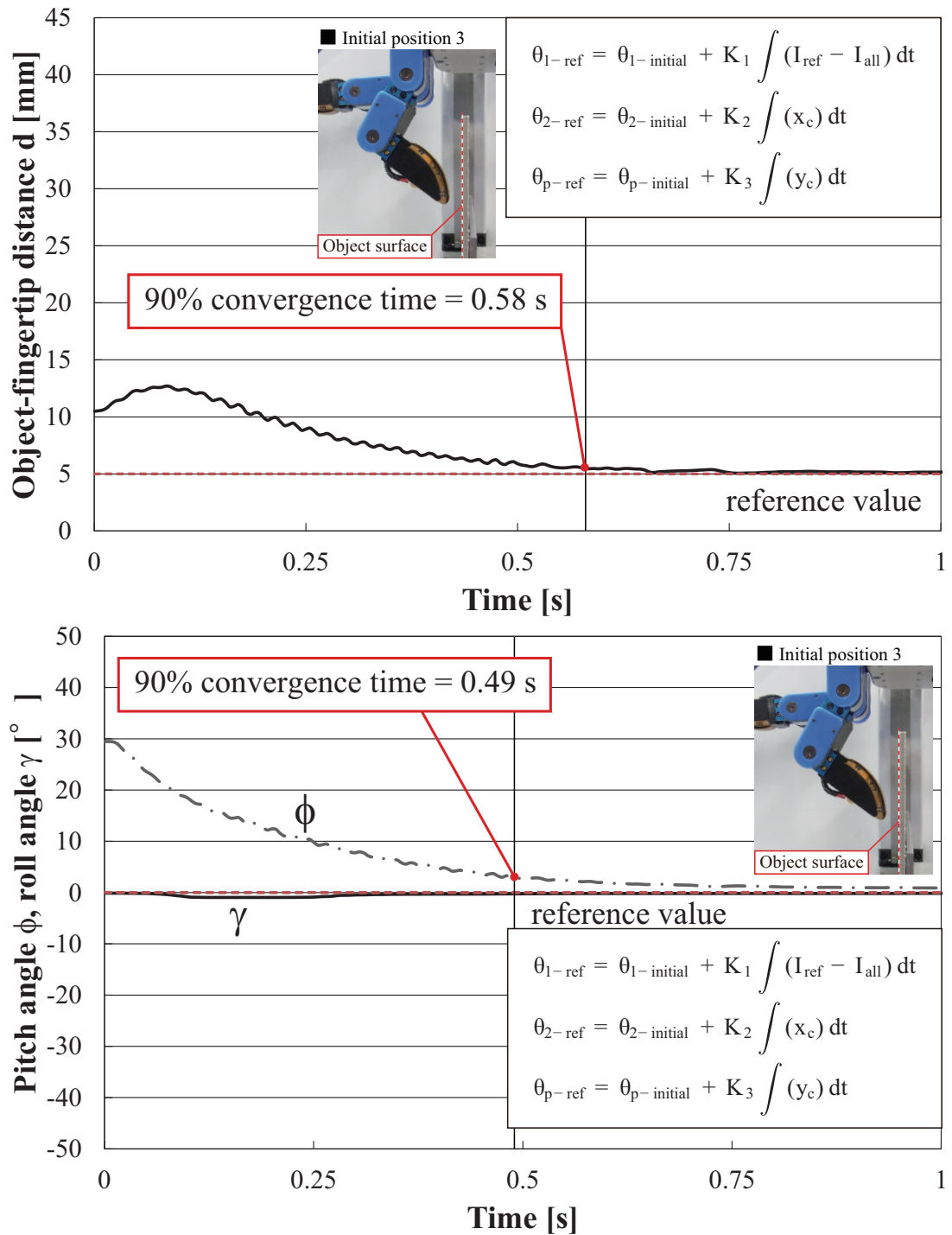


Fig. 6.19 Time change of distance and postures in independent control method (Initial position 3)

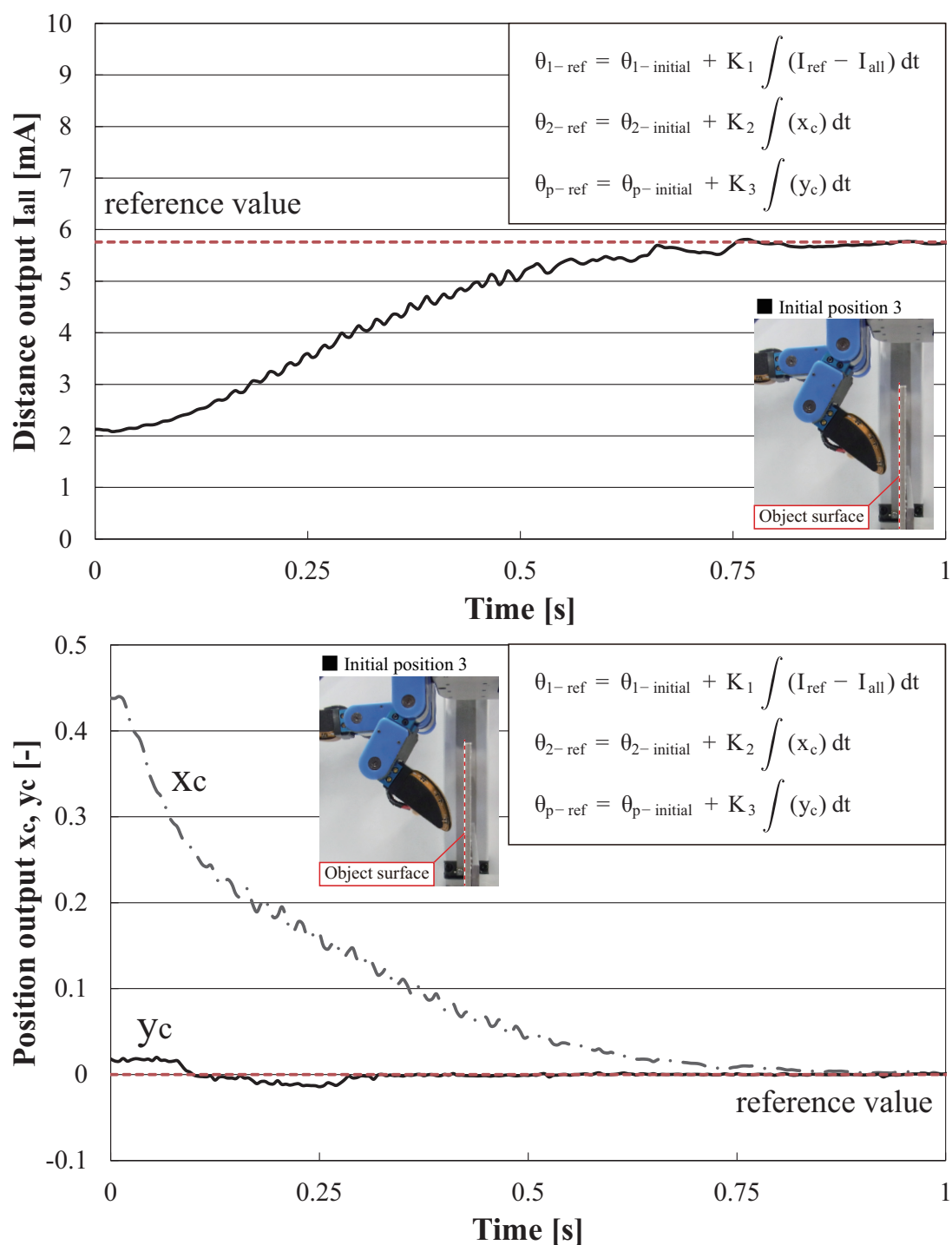


Fig. 6.20 Time change of sensor outputs in independent control method (Initial position 3)

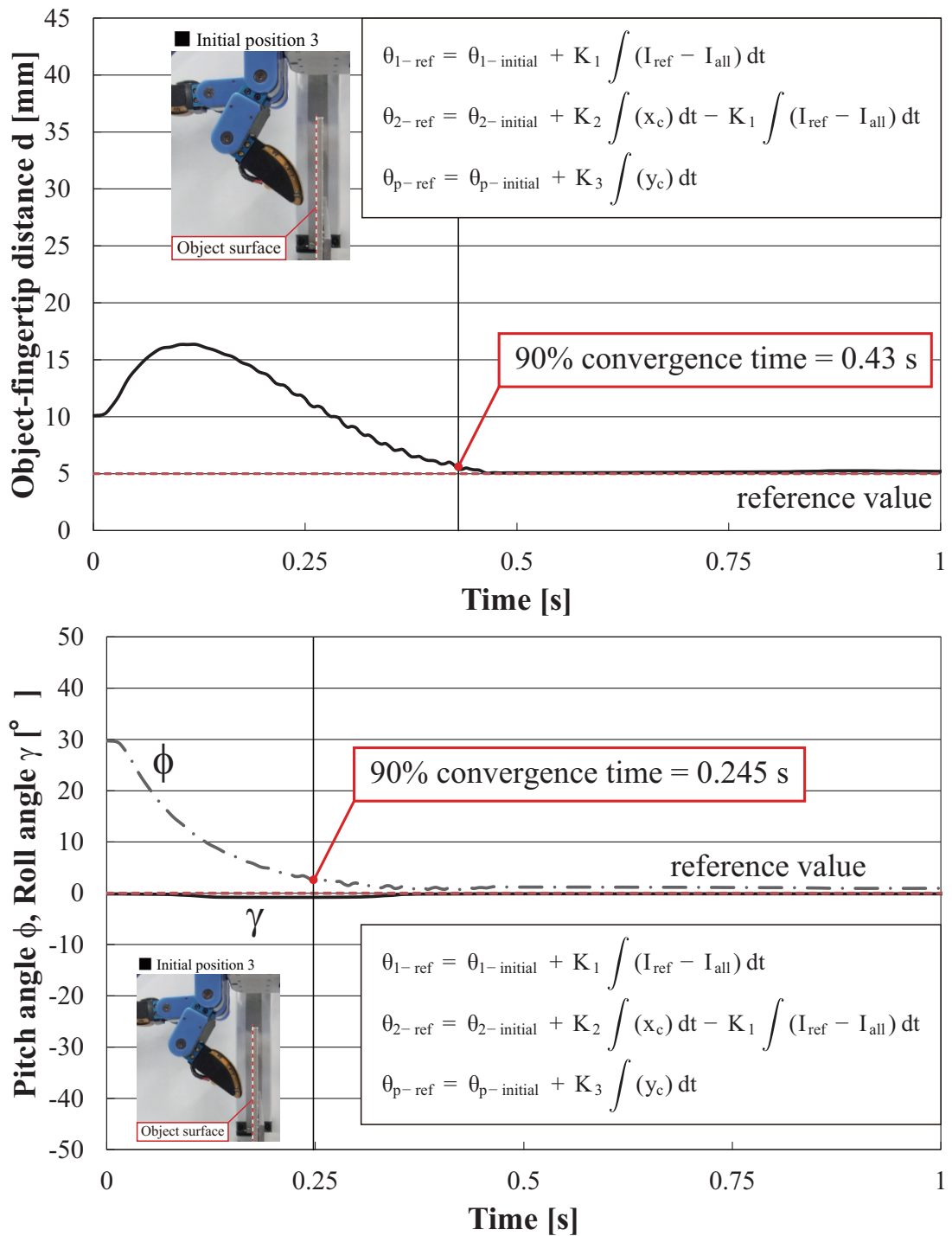


Fig. 6.21 Time change of distance and postures in interference control method (Initial position 3)

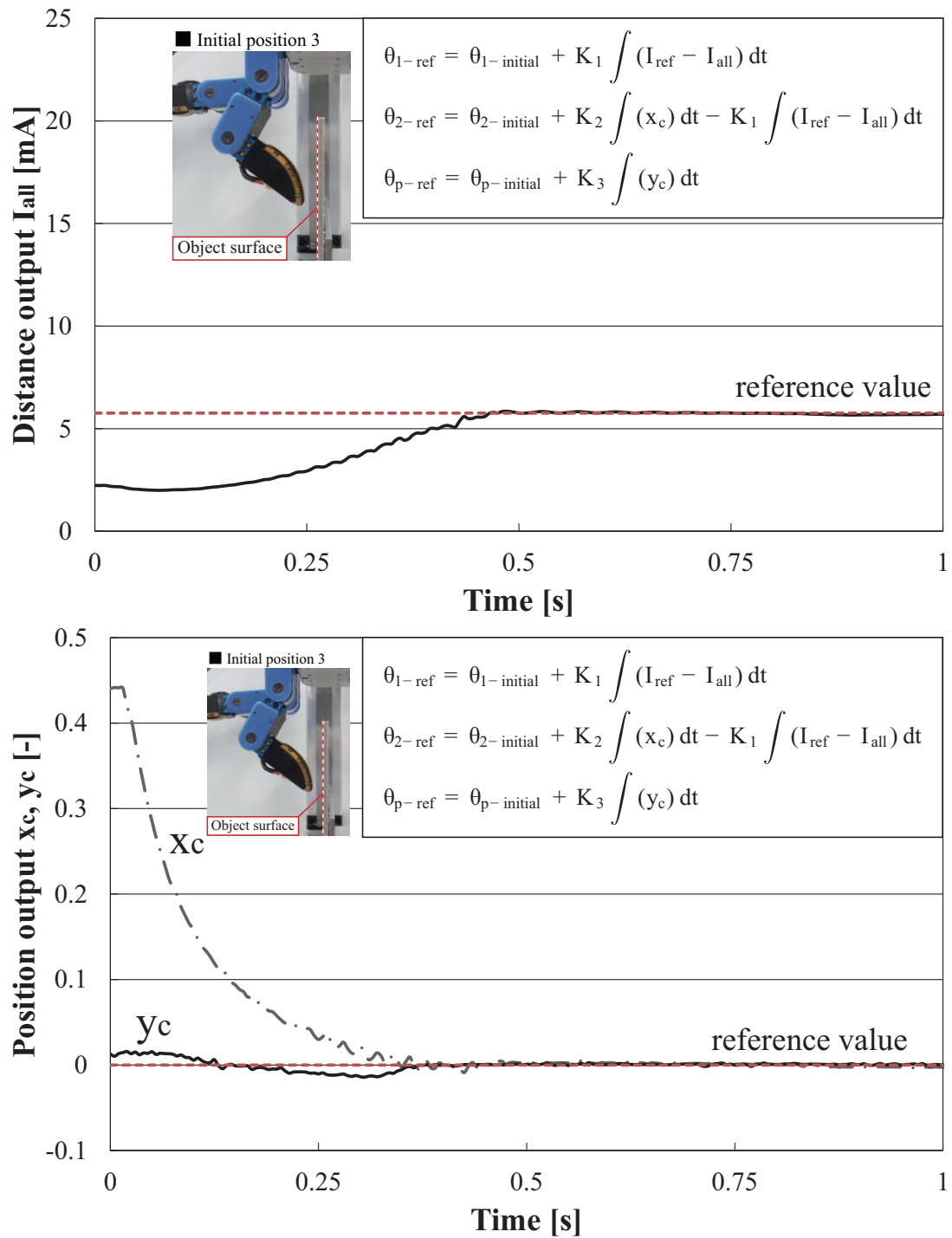


Fig. 6.22 Time change of sensor outputs in interference control method (Initial position 3)

Table 6.4 Convergence time of distance and postures in independent and interference control method

■ Initial condition 1

	Independent control	Interference control
t_d 90%	0.27 s	0.305 s
t_ϕ 90%	-	-
$d_{\text{overshoot}}$	-	-
Remarks	-	Convergence time is short near the reference value

■ Initial condition 2

	Independent control	Interference control
t_d 90%	0.18 s	0.33 s
t_ϕ 90%	0.18 s	0.35 s
$d_{\text{overshoot}}$	3.5 mm	4.2 mm
Remarks	-	vibration arise

■ Initial condition 3

	Independent control	Interference control
t_d 90%	0.58s	0.43 s
t_ϕ 90%	0.49 s	0.245 s
$d_{\text{overshoot}}$	-	-
Remarks	-	-

6.3 距離・ピッチ角・ロール角の同時調整実験

次に、距離とピッチ角に加えて、ロール角周りの姿勢誤差も生じさせ、これらの誤差を独立制御方式により修正可能か実験で検証した。初期位置はハンド指関節の可動域内で、かつ、対象物と指先が干渉しない条件下で、距離10～60 mm、ピッチ角 $\phi = -45 \sim 30^\circ$ 、ロール角 $0 \sim 45^\circ$ の範囲で変化させた。一例として、図6.23（左）の初期位置（距離40 mm、ピッチ角 -45° 、ロール角 45° ）から制御を開始した際の実験結果を図6.24・6.25に示す。図6.23（左）の初期位置から同図（右）に示す物体面と指先が正対した最終位置に収束した。この際の物体と指先間の距離の変化が図6.24（上段）であり、同図（下段）はピッチ角・ロール角の変化を示している。同様に、図6.25（上段）は距離出力 I_{all} 、同図（下段）は位置出力 x_c, y_c をプロットしてある。図6.24（上段）より、距離が目標値に収束するまでの90%収束時間は0.165 sであり、ピッチ角の90%収束時間は0.18 s、ロール角の90%収束時間は0.135 sと、比較的短い時間で姿勢と距離の同時調整が行えている。

また、異なる5つの初期位置から制御を開始した際の指先の軌跡を図6.26に示す。図6.26は近接覚センサの位置出力 x_c, y_c の原点である指腹中心の X, Y, Z 位置を30 msごとにプロットしたものである。5つの線はそれぞれ異なる初期位置から最終位置までの軌跡を示している。なお、対象物面は $X = 0$ mmである。5つの軌跡は時間経過と共に、一つの軌道上に集まり、最終的に一

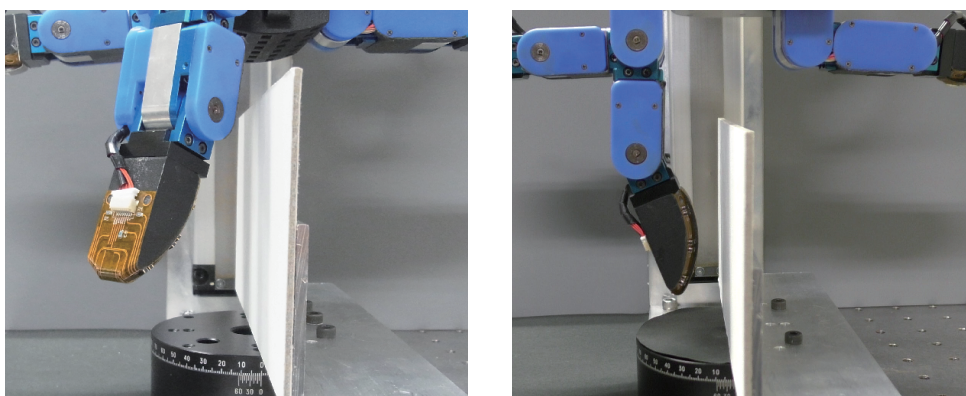


Fig. 6.23 (Left)Initial position ($d = 40$ mm, $\phi = -45^\circ$, $\gamma = 45^\circ$), (Right)Final position

点に収束している．センサの計測レンジ内であれば，センサ出力が目標値となる姿勢・距離は一点のみであるため，初期位置を変化させても物体と指先の間での誤差を修正可能である．

また，その他の初期位置での距離と姿勢の90%収束時間と，オーバーシュートや衝突の有無を表6.5に示す．2種類の制御方式での応答特性の比較を行った際に述べた通り，比較的大きな負のピッチ角誤差が生じている場合，近距離で屈曲関節 θ_2 が傾き修正を行うため，距離にオーバーシュートが生じる．この結果，初期距離10mm，ピッチ角 $\phi = -45^\circ$ ，ロール角 0° においては，ピッチ角誤差を修正しきれずに対象物と指先が衝突した．この時の距離，ピッチ角，ロール角の変化を図6.27に，センサ出力変化を図6.28に示す．図6.27（上段）より，0.09sで目標距離近傍に到達しているが，この時点ではまだピッチ角 $\phi = -27^\circ$ であり，この誤差を修正しきれずに0.13sに対象物と指先が接触した．

これらの結果から，ピッチ角誤差が 0° 以上の場合はオーバーシュートなしで距離と姿勢の誤差を修正できるが，ピッチ角誤差が負で，かつ物体との距離が近い場合，オーバーシュートが生じやすい欠点があることを確認した．

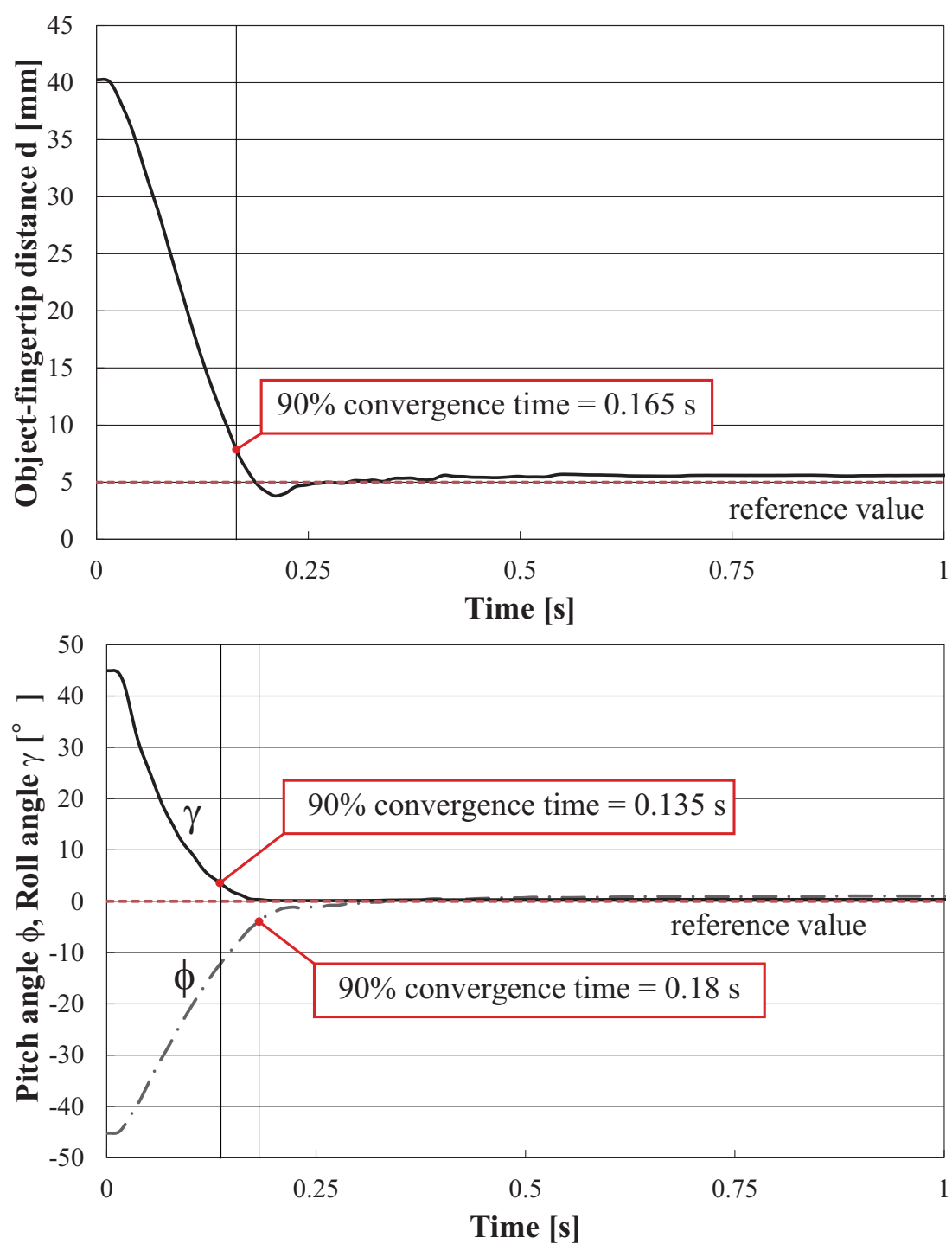


Fig. 6.24 Time change of distance and postures in independent control ($d = 40$ mm, $\phi = -45^\circ$, $\gamma = 45^\circ$)

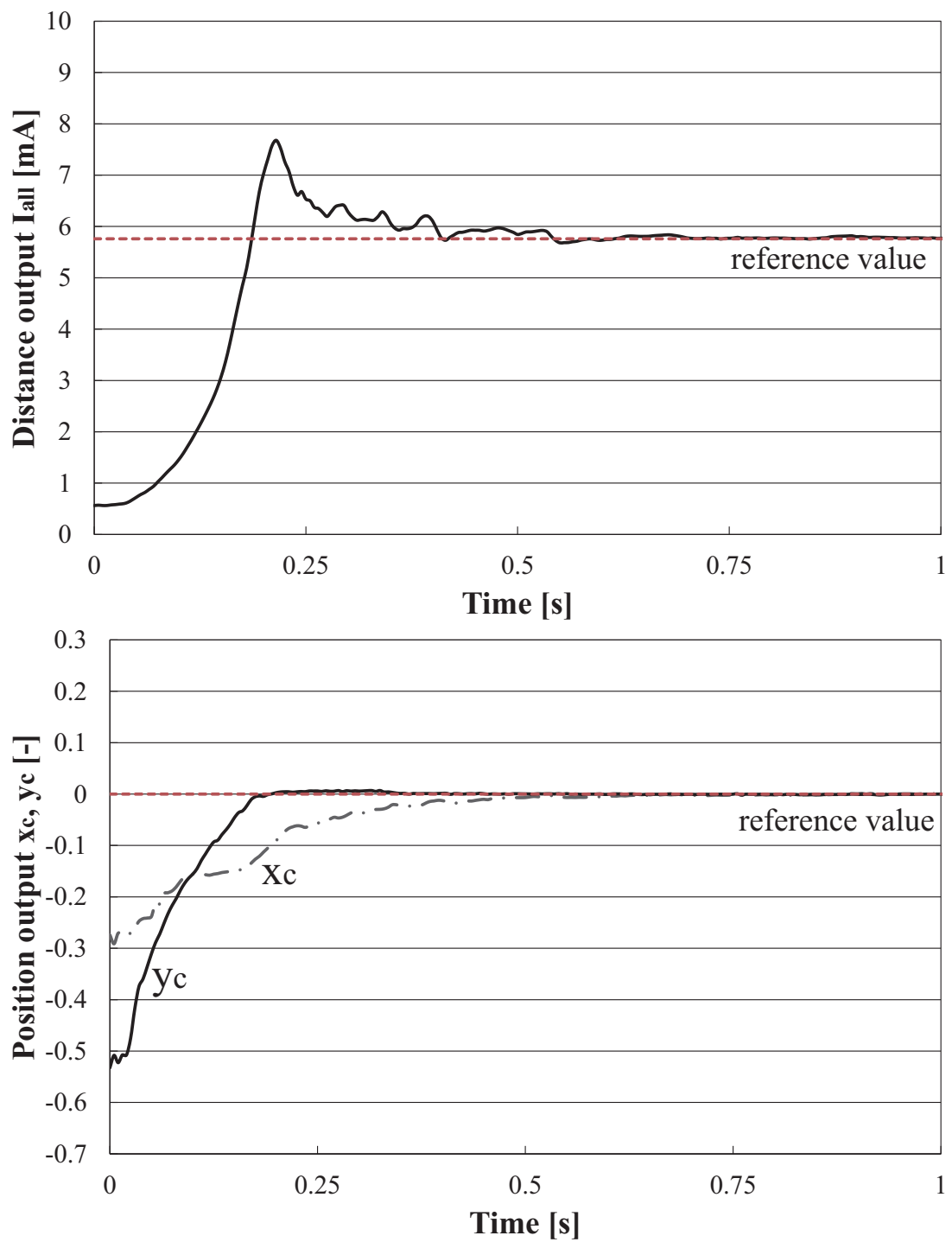


Fig. 6.25 Time change of sensor outputs in independent control ($d = 40$ mm, $\phi = -45^\circ$, $\gamma = 45^\circ$)

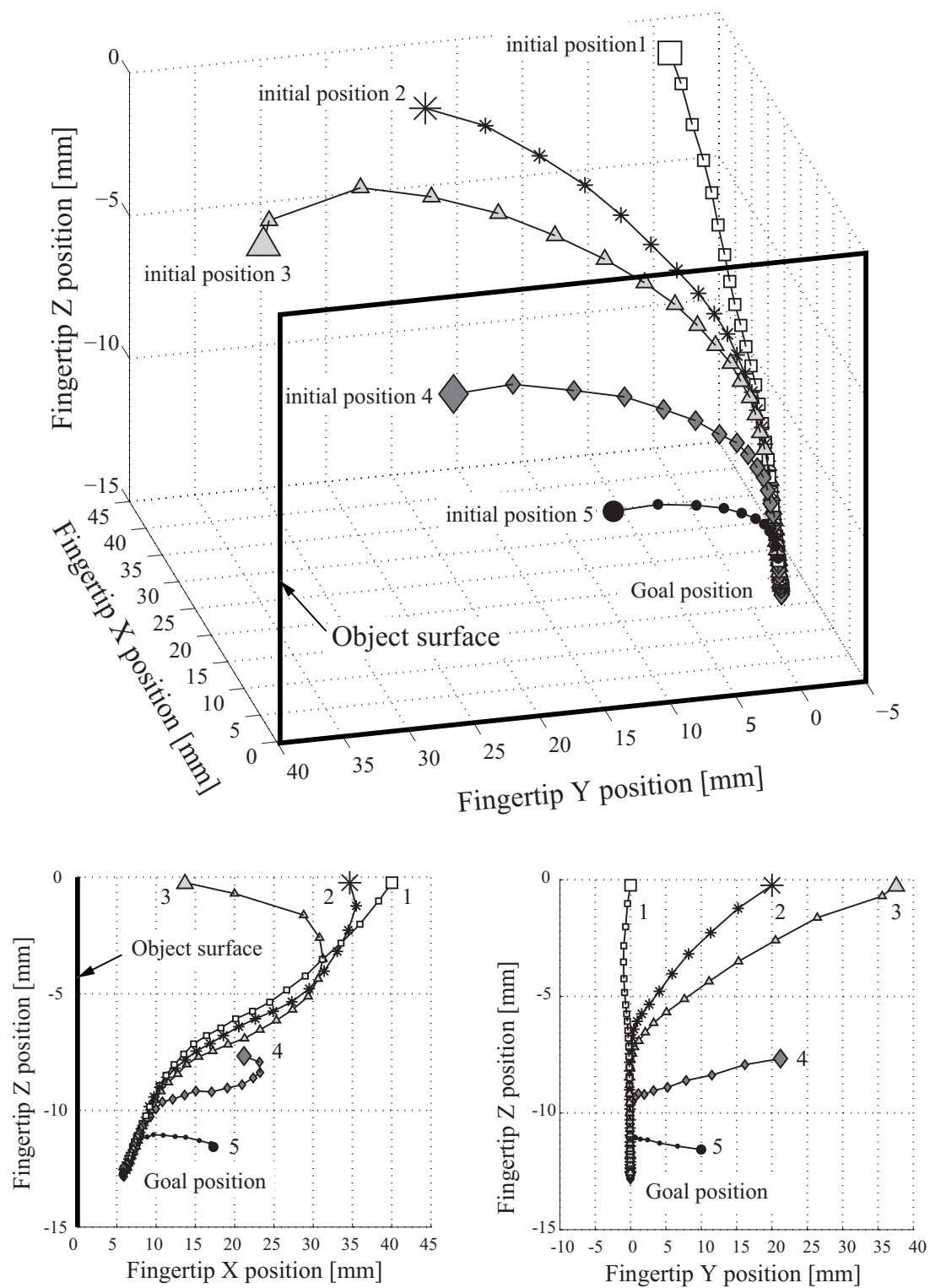


Fig. 6.26 Trajectory of fingertip position (independent control method)

Table 6.5 Convergence time of distance and postures at each initial position

distance d	Pitch ϕ	Roll γ	$t_{d_{90\%}}$	$t_{\phi_{90\%}}$	$t_{\gamma_{90\%}}$	$d_{overshoot}$	Collision
10 mm	0°	0°	0.095 s	-	-	-	-
10 mm	0°	30°	0.3 s	-	0.06 s	-	-
10 mm	0°	45°	0.315 s	-	0.06 s	-	-
10 mm	30°	30°	0.87 s	0.495 s	0.055 s	-	-
10 mm	30°	45°	0.81 s	0.53 s	0.06 s	-	-
10 mm	-30°	0°	0.31 s	0.2 s	-	4.59 mm	-
10 mm	-45°	0°	0.315 s	0.24 s	-	> 5.0 mm	○
30 mm	0°	30°	0.3 s	-	0.105 s	-	-
30 mm	0°	45°	0.31 s	-	0.1 s	-	-
30 mm	-30°	0°	0.13 s	0.15 s	-	1.5 mm	-
30 mm	-30°	30°	0.125 s	0.145 s	0.105 s	1.2 mm	-
30 mm	-30°	45°	0.125 s	0.14 s	0.1 s	0.94 mm	-
30 mm	-45°	30°	0.135 s	0.19 s	0.11 s	4.8 mm	-
30 mm	-45°	45°	0.145 s	0.195 s	0.11 s	4.6 mm	-
60 mm	-30°	0°	0.33 s	0.6 s	-	-	-
60 mm	-30°	30°	0.33 s	0.585 s	0.185 s	-	-
60 mm	-30°	45°	0.33 s	0.62 s	0.17 s	-	-

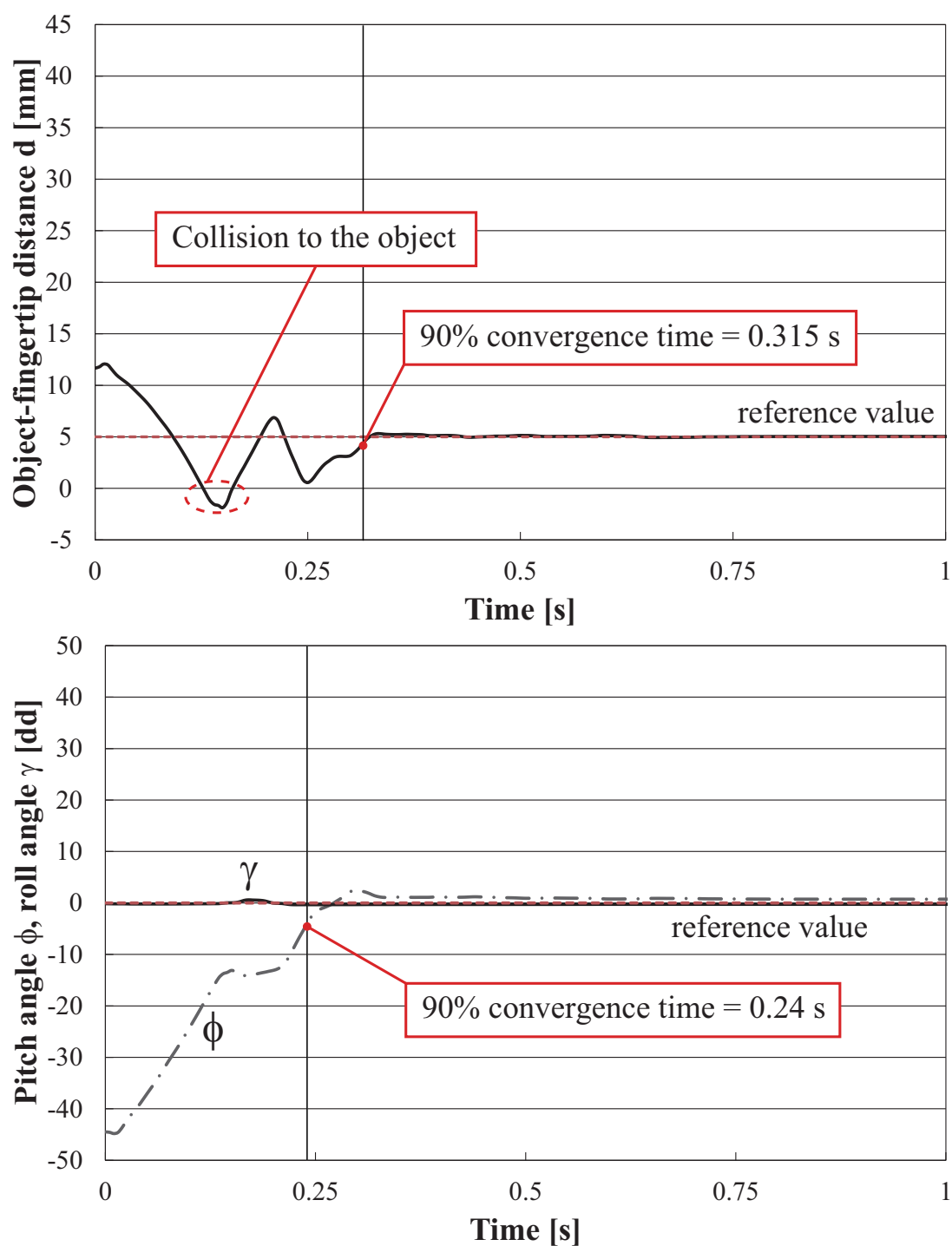


Fig. 6.27 Time change of distance and postures in independent control method ($d = 40$ mm, $\phi = -45^\circ$, $\gamma = 45^\circ$)

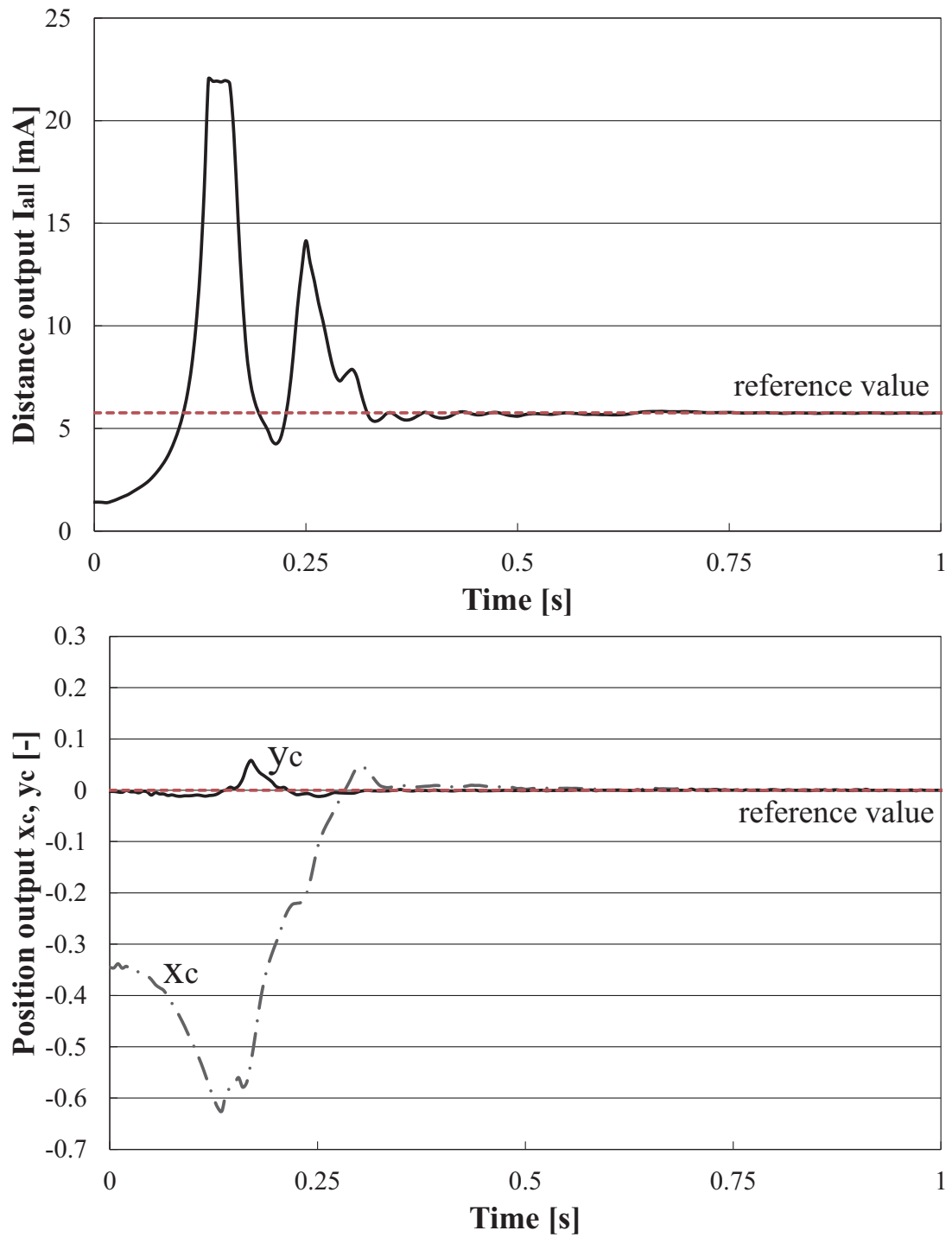


Fig. 6.28 Time change of sensor outputs in independent control method ($d = 40$ mm, $\phi = -45^\circ$, $\gamma = 45^\circ$)

6.4 実際の対象物に対するプリグラスプ実験

次に曲面を持つ対象物や，表面に模様が印刷された対象物に対し，独立制御方式により指先を正対させることが可能か実験により確認した．なお対象面の反射率が未知の場合，センサの距離出力 I_{all} の最大値が変化するため，一定距離に指先を調整することはできない．ただし，4章の傾き検出実験の結果より，対象物表面に模様がある場合や，曲面を持つ場合においても，位置出力 x_c, y_c の原点は変化しないため，指先を正対させることは可能であると考えた．そこで，この実験では距離出力の目標値を $I_{\text{ref}} = 3.0\text{mA}$ と比較的小さめの値を設定し，物体形状に沿って3指の配置を調整可能か確認した．対象物としてりんご，箱をハンドに近づけ，制御を実行した際の連続写真を図6.29に示す．図6.29上の初期姿勢から，各指が位置と姿勢を変化させながら，物体面と正対する姿勢に収束していく様子が分かる．最終的に，0.9s程度で同図下の物体面と各指先が正対した姿勢に収束した．この結果から，把持対象物が曲面を持つ場合や，表面に模様がある場合でも，距離出力の目標値 I_{ref} を適切に設定すれば，プリグラスプが可能であると言える．

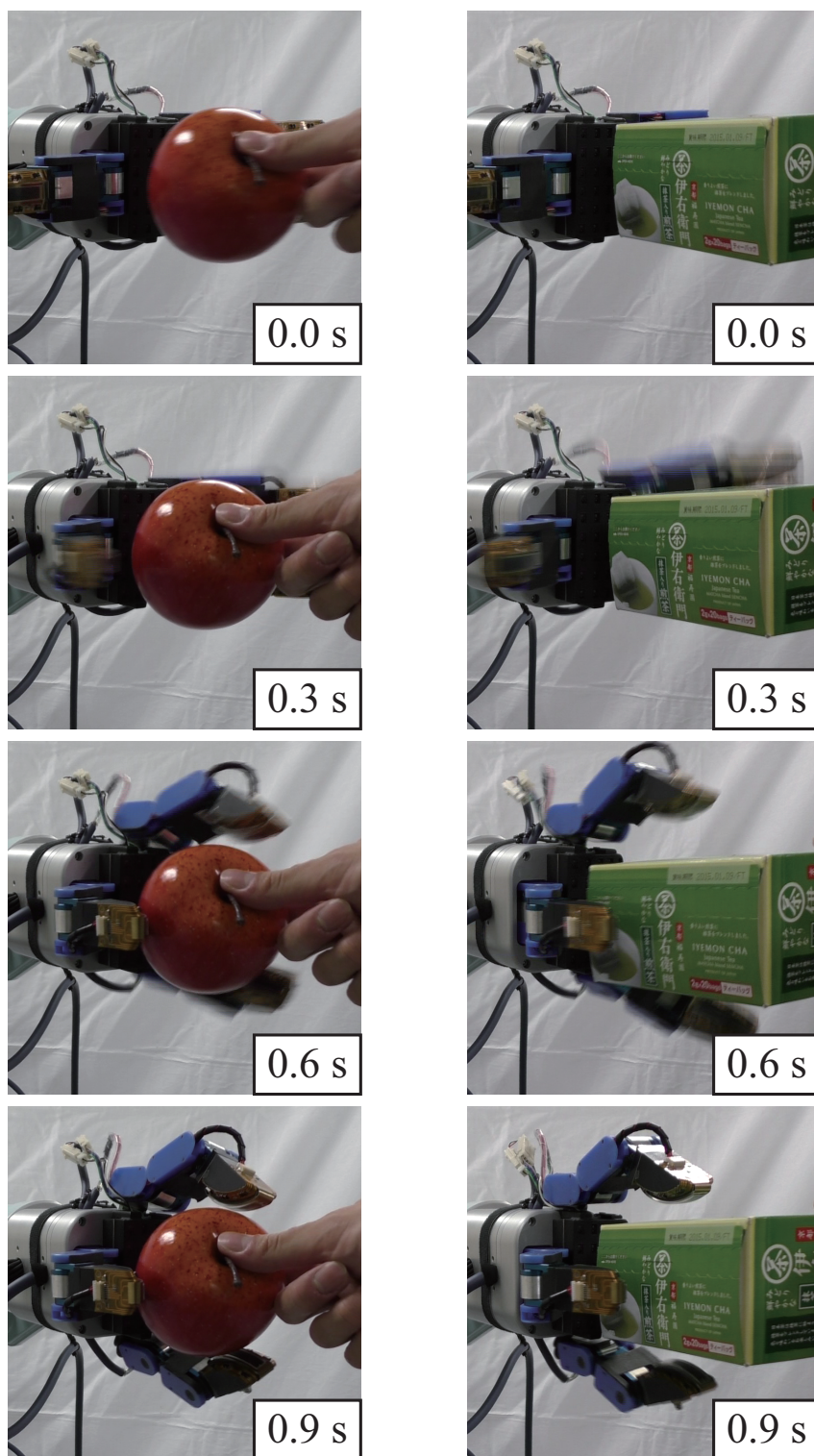


Fig. 6.29 Pre-grasp motion to apple and printed-paper box

6.5 分散して配置した制御器によるプリグラスプ実験

独立制御方式では、関節とセンサ出力とを一对一对応としているため、各関節ごとに制御器を分散して配置することで、プリグラスプの機能をモジュール化することが可能である。これにより、ハンドの制御器を小型化でき、また、各関節の制御ループを高速化できるメリットがある。さらに、指の本数や関節数の変更が比較的容易に行えるようになるため、将来的に4本指以上での物体操作の研究を行う際に有利になると考えている。

本論文では、このモジュール型ハンドのプロトタイプとして、DCモータとハーモニックドライブ減速機で構成されるハンドを用い、アナログ回路によるフィードバック系を構築した。センサ出力とフィードバック回路、および各関節のモータとの接続関係を図6.30に示す。近接覚センサの抵抗回路網端部の電圧出力 V_{S1} , V_{S2} , V_{S3} , V_{S4} は、オペアンプによる演算回路により、電圧出力 V_x , V_y , $V_{I_{all}}$ として出力される。この演算回路は4章で述べたアンプ回路と同じものを用いる。次に、電圧出力 V_x , V_y , $V_{I_{all}}$ は各関節に分散して配置したアナログ回路に入力され、位置出力 x_c , y_c , または距離出力の偏差 $I_{all} - I_{ref}$ に応じたモータ駆動用のPWM信号が生成される。

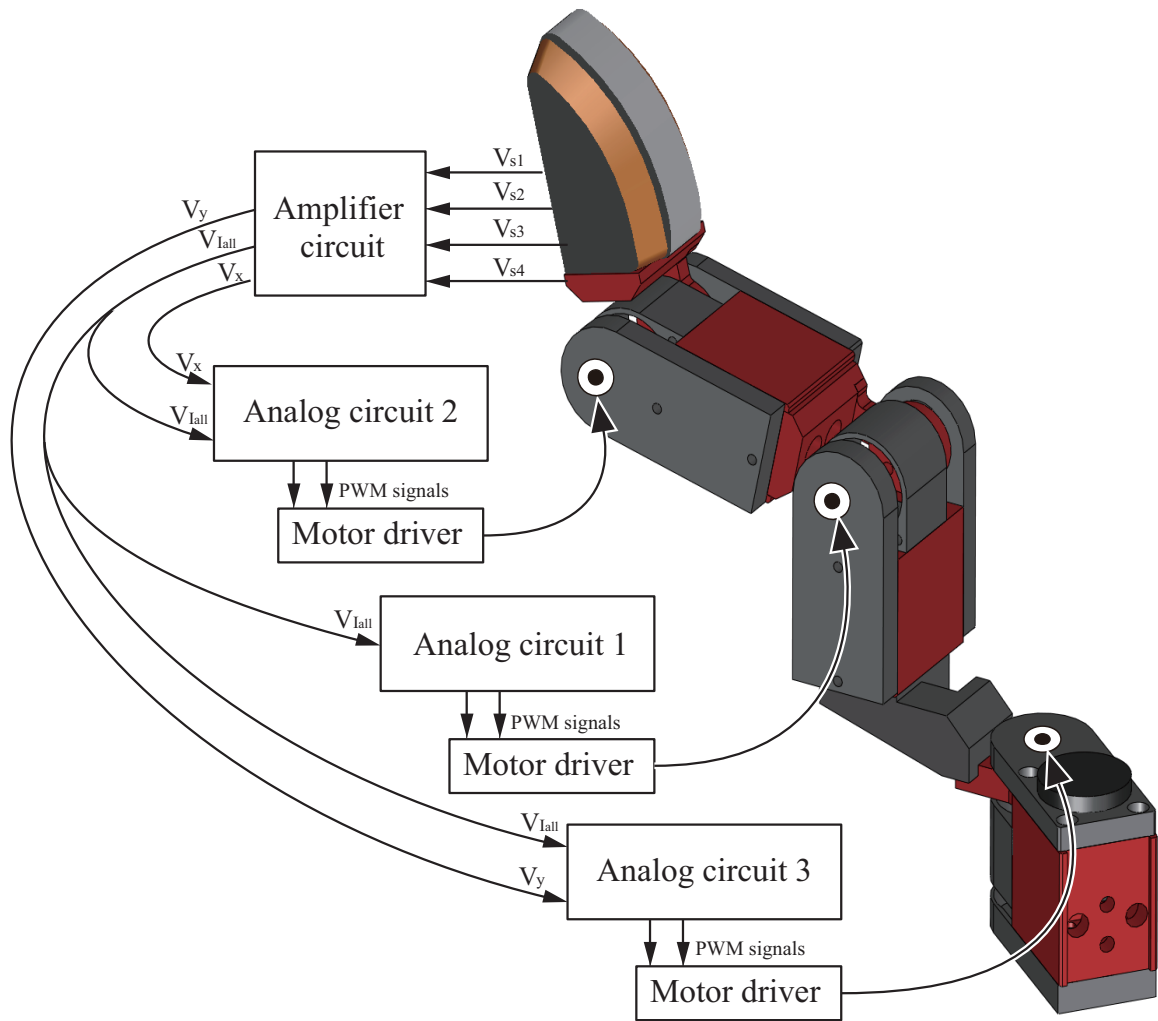


Fig. 6.30 Overview of proximity sensor feedback loop

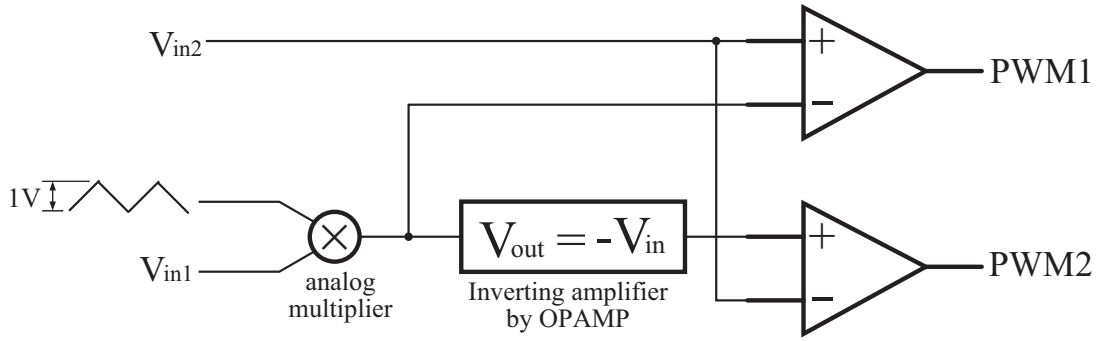


Fig. 6.31 Circuit for converting the ratio of analog voltage to PWM signals

ここで、位置出力 x_c, y_c の計算には、 $\frac{V_x}{V_{I_{all}}}$ 、および $\frac{V_y}{V_{I_{all}}}$ を計算する必要があるが、小型のアナログ回路で2変数の除算を実現することは非常に難しい．そこで、関節のモータを駆動するためのPWM波形生成回路とアナログ乗算器とを組み合わせることで、除算とパルスへの変換を統合的に行うアナログ回路を構成した．図6.31にこの回路図を示す．回路図を分かりやすくするためにアナログ乗算器と反転増幅回路は簡略化してある．なお、入力電圧の範囲は、 V_{in2} は正負両電圧であり、 V_{in1} は正電圧のみを扱うものとし、 $V_{in1} \leq |V_{in2}|$ とする．入力電圧 V_{in2} と三角波を乗算した V_{in1} とをコンパレータ回路で比較することで、 V_{in1}/V_{in2} の比率でON/OFFする三角波の周期と等しいPWM信号が得られる．2つのコンパレータ回路のうち、上段は V_{in1} が正電圧信号の際にPWM信号を出力し、下段は V_{in1} が負電圧の時にPWM信号を出力する．このアナログ電圧の比率とPWMのデューティ比（ON/OFF時間の割合）の関係を式(6.28)・(6.29)に示す．

$$PWM_{1-duty} = \begin{cases} \frac{V_{in1}}{V_{in2}} & \text{if } V_{in1} > V_{offset} \\ 0 & \text{if } V_{in1} \leq V_{offset} \end{cases} \quad (6.28)$$

$$PWM_{2-duty} = \begin{cases} 0 & \text{if } V_{in1} > -V_{offset} \\ \frac{|V_{in1}|}{V_{in2}} & \text{if } V_{in1} \leq -V_{offset} \end{cases} \quad (6.29)$$

ここで V_{offset} は、コンパレータ回路に使用するオペアンプの入力オフセット電圧である．この回路により、 $\frac{V_x}{V_{I_{all}}}$ 、または $\frac{V_y}{V_{I_{all}}}$ が計算でき、位置出力 x_c, y_c の

正負の方向とその大きさに応じた2つのPWM信号が得られるため，これをHブリッジ型モータドライバの入力とした．

製作したフィードバック回路を図6.32に示す．回路は，CMOSのタイマーICとアナログ乗算器それぞれ一つずつと，2回路入り汎用オペアンプ7個，計装アンプ1個，モータドライバ3個で構成され，全てアナログ素子である．使用したオペアンプ等のICの型番を表6.6に示す．

Table 6.6 Main specification of the IC using for the analog circuit

Item	Company	Model number	Required number	Supply voltage [V]
Timer IC	National semiconductor	LMC555	1	15.0
Analog multiplier	ANALOG DEVICES	AD633JN	1	± 15.0
OP AMP	TEXAS INSTRUMENTS	TL052C	7	± 15.0
Instrumentation AMP	ANALOG DEVICES	AD622ARZ	1	± 15.0
Motor driver	TOSHIBA	TB6643KQ	3	11.1

この回路は，タイマーICでデューティ比50%，18kHzの矩形波を生成し，抵抗とコンデンサによる一次のローパスフィルタを通過させ，擬似的な三角波を作る．得られた擬似三角波は $I_{\text{all}} - I_{\text{ref}}$ の電圧出力 $V_{I_{\text{all}}} - V_{I_{\text{ref}}}$ をPWMに変換するためのコンパレータ回路と，アナログ乗算器に入力される．なお，目標値 $V_{I_{\text{ref}}}$ は，可変抵抗の分圧により入力することとした．アナログ乗算器では，擬似三角波と I_{all} の電圧出力 $V_{I_{\text{all}}}$ を乗算し， $\frac{V_x}{V_{I_{\text{all}}}}$ と $\frac{V_y}{V_{I_{\text{all}}}}$ の比率に応じたPWM生成のための基準信号を作る．各コンパレータ回路で生成されたPWM信号は，ダイオードにより半端整流され，抵抗による分圧回路でモータドライバICの入力電圧範囲に振幅が調整される．モータの駆動電圧は

11.1V (3セルのリチウムポリマーバッテリー) とし, 2個の絶縁型DC-DCコンバータでオペアンプ等のICとLEDの駆動電圧を供給した. 表6.9に使用した絶縁型DC-DCコンバータの型番, 主な仕様を示す. なお, アナログ回路で

Table 6.7 Main specification of DC-DC converters

Item	Company	Model number	V_{out} [V]	Max. I_o [A]
DC-DC for AMP	COSEL	SUW31215	± 15	0.1
DC-DC for LED	COSEL	SUS1R51212	12	0.13

制御する関係上, LEDのパルス発光制御は行わず, 連続点灯とした. また, x_c, y_c のフィードバックゲインに相当するアンプ回路の V_x, V_y 出力のゲインと, $V_{I_{\text{all}}} - V_{I_{\text{ref}}}$ のゲインは, 実験的に決めた. これらのゲインと近接覚センサの内部抵抗, 外部抵抗値を表6.8・6.9に示す.

Table 6.8 Gain of analog feedback circuit

Item	Symbol	Value	Unit
$V_{I_{all}}$ output gain	K_{g1}	1.0	-
V_x output gain	K_{g2}	7.73	-
V_y output gain	K_{g3}	7.73	-

Table 6.9 Parameter of analog circuit

Item	Symbol	Value	Unit
Resistor of Sensor LED	-	51.0	Ω
Forward current of Sensor LED	-	94.0	mA
Sensor internal resistor	r	330.0	Ω
Sensor Outer resistor	R_o	360.0	Ω
Resistor of adder circuit	R_1, R_2, R_3, R_4, R_5	10.0k	Ω
Gain resistor 1 of inverting amplifier circuit	R_6	15.0k	Ω
Gain resistor 2 of inverting amplifier circuit	R_7	15.0k	Ω
Gain resistor 1 of instruments AMP (V_x output)	R_8	7.5k	Ω
Gain resistor 2 of instruments AMP (V_y output)	R_9	7.5k	Ω

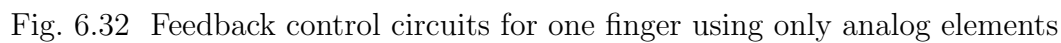


Fig. 6.32 Feedback control circuits for one finger using only analog elements

アナログ回路によるプリグラスプ動作の様子を図6.33に示す．平面の対象物（標準反射板）をランダムに位置や姿勢を変化させ，これに対し，指先を追従させた．左列上が初期姿勢であり，右列下まで0.1sごとの動作を示している．図の連続写真は0.1sごとのものであるが，各写真において，物体と指先との間で姿勢の誤差はほとんどなく，高速に指を調整できている．

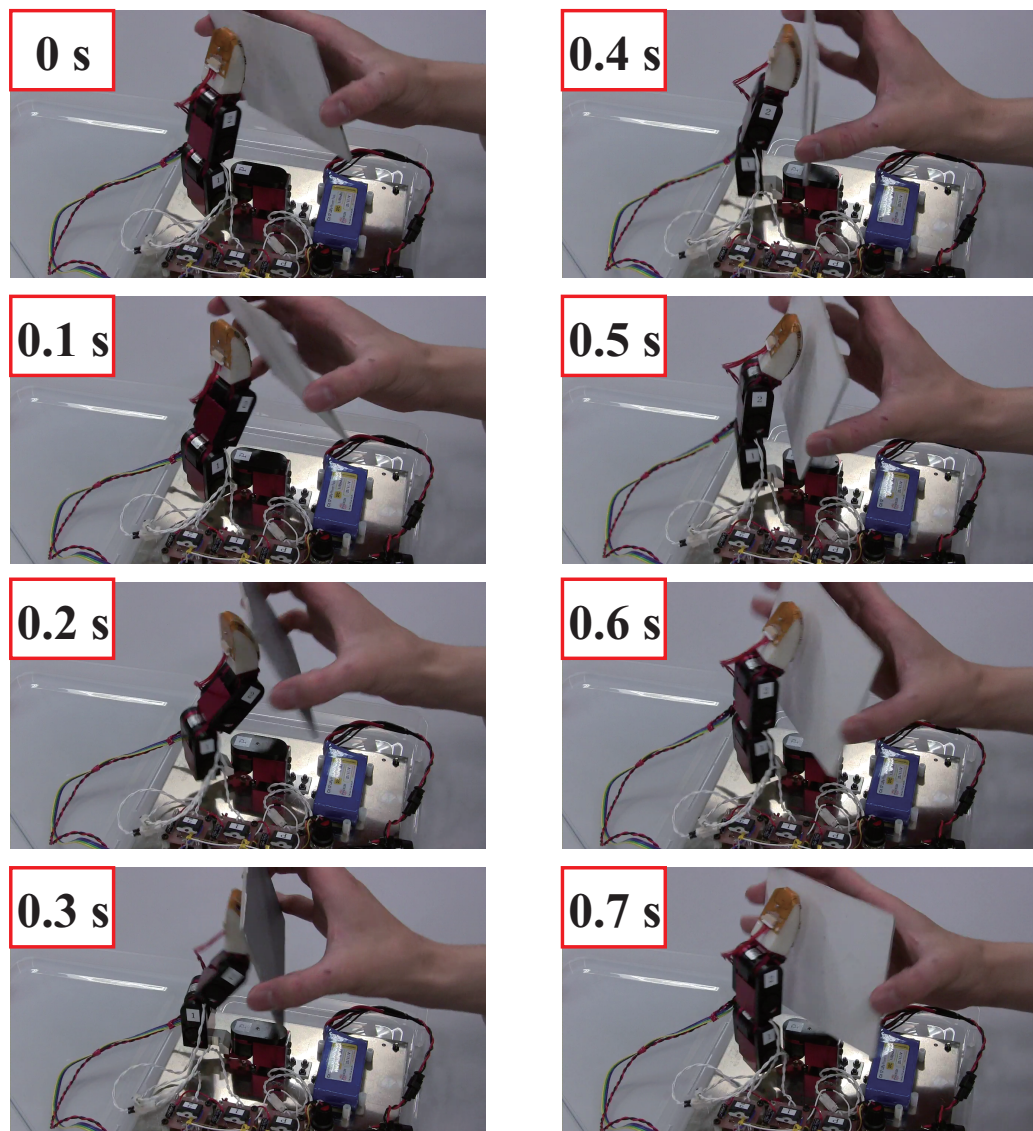


Fig. 6.33 Pre-grasp motion for moving object (using analog feedback circuits)

6.6 まとめ

本章では、把持前に物体面に倣って各指の配置を調整する動作“プリグラスプ”を実現するための2つの制御方式を提案し、実験によりその応答特性を検証した。両方式ともセンサ出力で直接関節を駆動する反射型制御であり、逆運動学を用いないことから運動学的な特異点を持たない利点がある。さらに、関節ごとに制御器を配置しフィードバック系を構成することで、プリグラスプの機能をモジュール化できるメリットを持つ。

まず、2つの制御方式の比較実験を行った結果から、両方式とも負のピッチ角誤差を修正する際、距離にオーバーシュートが生じることと、独立制御方式の方がオーバーシュート量が小さく、目標距離の近傍で振動が発生しないことを確認した。次に、独立制御方式を用いて、距離、ピッチ角、ロール角誤差の同時修正実験を行った結果から、距離0～60mm、ピッチ角 -45° ～ 30° 、ロール角 0° ～ 45° の範囲の誤差を修正可能なことを明らかにした。ただし、距離10mm、ピッチ角 -45° 、ロール角 0° においては、距離に比較的大きなオーバーシュートが生じたことにより、物体と指先が衝突した。この結果から、負のピッチ角誤差を修正する場合は、目標距離から十分離れた地点から制御を開始するべきであると考えられる。

またこの他、りんごのように曲面を持つものや、表面に模様が印刷された対象物においても、距離出力 I_{all} の目標値を適切に設定することで、姿勢と距離の同時制御が可能であることを確認した。

さらに、モジュール化ハンドの試作として、DCモータとハーモニックドライブ減速機で構成されるハンドにアナログ回路によるフィードバック系を構築した。この試作機により、各関節に分散して配置したフィードバック回路により、独立制御方式の実現が可能であることを確認した。制御器を分散させることで、フィードバック系を小型化することができ、かつ各関節の制御周期を高速化できるメリットがある。また、将来的に4指以上での物体操作を行う際に、比較的容易に関節数や指数を変更できる点も有利であると考えている。

第7章

物体表面の光の反射率によらない把持制御

6章のプリグラスプ制御方式では，物体表面の光の反射率は既知としたが，実際の対象物は表面の色，模様，材質等が様々であり，その反射率は未知である場合が多い．このため，実環境では，物体面の光の反射率に依存しない把持制御が必要となる．そこで，本章では，物体表面の光の反射率によらない指先の1)絶対距離制御と2)相対速度制御を提案し，この応用例として“全指同時接触での把持”と“高速かつソフトタッチでの把持”の2つの把持動作を実現する．

7.1 絶対距離制御

本研究室では過去に，レーザーレンジファインダの反射光強度計測を利用して近接覚センサの出力を補正する手法^[76]や，2層の近接覚センサ出力の比をとることで物体表面の光の反射率（以降では反射率と呼ぶ）の影響を補正する手法^[77]を提案してきた．しかしながら，センサの実装スペースが少ないハンド指先上にこれらの手法を適用することは難しい．そこで本論文では，指先を移動させながらセンシングすることで新たな物体特徴量を検出する“アクティブセンシング”^[78]を用いる．

7.1.1 反射率推定手法

絶対距離制御においては，静止物体に対し指先をアプローチした際の相対移動距離と距離出力 I_{all} の変化率から反射率を推定し， I_{all} 出力の補正を行う．ここで， I_{all} は各フォトリフレクタに流れる光電流の総量であることから，物体と指先との距離とフォトリフレクタに流れる光電流の関係が重要となる．

フォトリフレクタ単素子の距離－光電流モデル

そこで，フォトリフレクタ単素子に流れる光電流 I_L と物体との距離 Z に関する近似式を求める．図7.1に示すように，フォトリフレクタのLED，フォトトランジスタと検出物体面が距離 Z 離れた位置にあるモデルを考える．なお，物体面とLED面，フォトトランジスタ面は平行とし，LEDとフォトトランジスタ間の距離は d_c とする．また，光電流 I_L と距離 Z の近似式を単純化するために，同図に示すように，LEDは点光源であり，反射光はLEDから物体面，フォトトランジスタ間での最短経路のみを考慮する．この場合，フォト

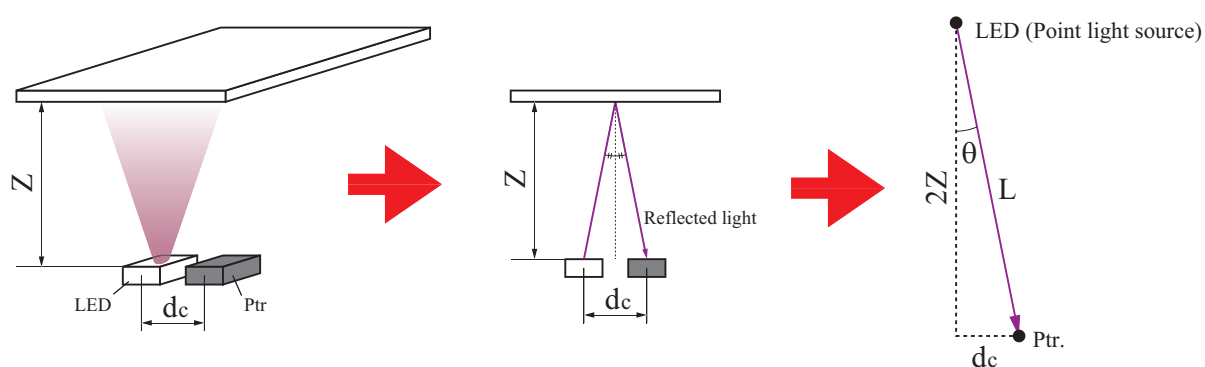


Fig. 7.1 Reflected light model of 1 photoreflexor

トランジスタに入射する反射光の照度 E は式 (7.1) で表される.

$$E = \frac{\alpha I}{L^2} \cos \theta \quad (7.1)$$

ここで, α は物体表面の光の反射率であり, I は LED の照射光の光束, L は LED から物体面, フォトトランジスタまでの光路長さである. さらに, 式 (7.1) に $\cos \theta = 2Z/L$ と $L = \sqrt{4Z^2 + d_c^2}$ を代入することで, 距離 Z と照度 E の関係式 (7.2) が得られる.

$$E = \frac{\alpha I Z}{4 \left(\sqrt{Z^2 + \frac{d_c^2}{4}} \right)^3} \quad (7.2)$$

次に, フォトトランジスタに流れる光電流 I_L は反射光の照度 E に比例することから, 式 (7.2) を基に次式で近似する.

$$I_L = \frac{\alpha k Z}{\left(\sqrt{Z^2 + \frac{d_c^2}{4}} \right)^3} \quad (7.3)$$

ここで, k は右辺と左辺の次元を揃えるための変換係数 (単位: mA/mm^2) である. 式 (7.3) より, 光電流は, 焦点距離より小さい距離においてはおよそ線形的に増大し, 焦点距離より遠方では, 距離の逆二乗に比例して減少する, 従って, 焦点距離より十分離れた距離においては, 光電流は式 (7.4) で近似できる.

$$I_L = \alpha k Z^{-2} \quad (7.4)$$

フォトリフレクタ単素子での反射率推定

次に, 近似式 (7.4) を利用し, 異なる2点間の相対移動距離とこの間の距離出力 I_L 値の変化率から反射率 α を推定する手法について説明する. 焦点距離より遠方では, 光電流は距離の逆二乗に比例することから, 式 (7.4) の両辺を $-1/2$ 乗することで, 距離に対し線形な出力 $I_L^{-1/2}$ が得られる (式 (7.5)).

$$I_L^{-1/2} = (\alpha k)^{-1/2} Z \quad (7.5)$$

よって, 2点の異なる距離 Z_1, Z_2 での光電流は, $I_{L_1}^{-1/2} = (\alpha k)^{-1/2} Z_1$, $I_{L_2}^{-1/2} = (\alpha k)^{-1/2} Z_2$ と表すことができ, この2点を通る直線の傾きを計算する

ことで、反射率・変換係数 αk の推定が可能となる． αk の推定式を式(7.6)に示す．

$$\alpha k = \left(\frac{(I_{L_2})^{-\frac{1}{2}} - (I_{L_1})^{-\frac{1}{2}}}{Z_2 - Z_1} \right)^{-2} \quad (7.6)$$

従って、対象物が静止物体であれば、フォトリフレクタの移動前後の光電流 I_{L_1}, I_{L_2} を計測し、相対移動距離 $\Delta Z = Z_1 - Z_2$ をエンコード値から順運動学で計算すれば反射率の推定が可能となる．これがアクティブセンシングに基づく反射率推定の基本原理となる．

近接覚センサの距離 $-I_{\text{all}}$ 出力モデルと反射率推定

近接覚センサの場合、フォトリフレクタを多数配置してあるため、LEDからの照射光を点光源と仮定することはできない．ただし、距離出力 I_{all} は全素子に流れる光電流の総和であることから、物体の光の反射率 α に比例し、距離増加に伴って減少する同様の特性を持っていると考えられる．

そこで、物体が焦点距離より十分離れた位置にあり、かつ近接覚センサと正対している場合、距離出力 I_{all} は、反射率・変換係数 αk に比例し、距離 d の $-n$ 乗に従って減少すると仮定する（式(7.7)）．

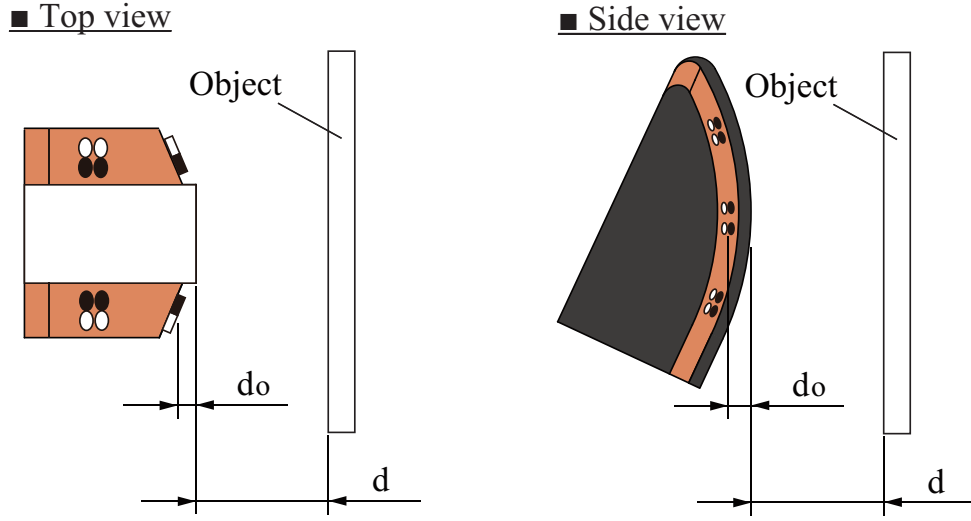
$$I_{\text{all}} = \alpha k (d + d_o)^{-n} \quad (7.7)$$

図7.2に示すように、 d_o はフォトリフレクタ面から接触面までのオフセット距離であり、 d_o, n は定数を用いる．なお、物体の反射率に依存せずに式(7.7)で距離出力 I_{all} を近似可能かについては、7.1.2節で検証する．

位置出力 $(x_c, y_c) \Rightarrow (0, 0)$ とするプリグラスプ制御下においては、常に物体面と指先面を正対させられるため、式(7.7)の近似条件を維持できる．従って、プリグラスプ動作中の異なる2点の指先位置での距離出力を $I_{\text{all}_1}, I_{\text{all}_2}$ とし、この間の相対移動距離を Δd とすると、反射率・変換係数 αk の推定式は、式(7.8)で表される．

$$\alpha k = \left(\frac{(I_{\text{all}_2})^{-\frac{1}{n}} - (I_{\text{all}_1})^{-\frac{1}{n}}}{\Delta d} \right)^{-n} \quad (7.8)$$

なお、相対移動距離 Δd は関節角度から順運動学で計算する．

Fig. 7.2 Offset distance d_o between photo-reflector and contact surface

この推定は任意の指先位置，および相対移動距離 Δd で計算可能であるため，物体との距離変化に伴い，距離出力が増減する毎に， I_{all1} , I_{all2} , Δd を更新することで，繰り返し計算が可能である．そこで，式(7.9)を用いて，距離出力 I_{all} が変化すると共に推定を行い， m 回平均を計算することで，外乱光や電氣的ノイズの影響を小さくする．

$$(\alpha k)_{mean} = \frac{1}{m} \sum \left(\frac{(I_{all_{i+1}})^{-\frac{1}{n}} - (I_{all_i})^{-\frac{1}{n}}}{\Delta d_i} \right)^{-n} \quad (7.9)$$

精度良く反射率・変換係数を推定することで，式(7.10)により，距離 $d = 0 \text{ mm}$ での距離出力 $I_{all_{d=0}}$ を触れる前に推定でき，また，式(7.11)により，実距離の推定も可能となる．本論文では，これらの出力を用いることで，反射率によらず物体と指先との間の絶対距離を制御する．

$$I_{all_{d=0}} = (\alpha k)_{mean} d_o^{-n} \quad (7.10)$$

$$d = \left(\frac{I_{all}}{(\alpha k)_{mean}} \right)^{-\frac{1}{n}} - d_o \quad (7.11)$$

7.1.2 近似式のパラメータ同定と誤差評価

本論文の反射率推定手法の適用可能範囲を明確にするために、近似式(7.7)の近似誤差を評価する．具体的には、まずコダックグレーカード90%ホワイトでの実験結果から、近似式のパラメータ n, d_o を同定し、次に、複数種類の物体での距離出力 I_{all} の実験値と近似値を比較する．なお、距離出力 I_{all} 値は、4章の4.3節の実験結果を用いる．

まず、乗数 n を同定する．距離出力 I_{all} が式(7.7)で近似可能とすると、適切な $-\frac{1}{n}$ により、式(7.12)を計算することで線形な出力が得られる．

$$I_{all}^{-\frac{1}{n}} = (\alpha k)^{-\frac{1}{n}} d + (\alpha k)^{-\frac{1}{n}} d_o \quad (7.12)$$

そこで、実験値から、最も直線との誤差が小さい $-\frac{1}{n}$ 乗を繰り返し計算で探索することで、最適な n を決定する．最もS/N比が高いセンサ出力が得られたコダックグレーカード90%ホワイトでの0～10mmの101点の I_{all} 値に対し、以下、1.～4.のステップで最適な $-\frac{1}{n}$ の探索を行った．

1. I_{all} を $-\frac{1}{n}$ 乗 ($-\frac{1}{n}(0)=$ 適当な初期値)．
2. $I_{all}^{-\frac{1}{n}}$ に最小二乗法で直線フィッティング．
3. 直線と $I_{all}^{-\frac{1}{n}}$ の誤差 error を計算．

$$\text{error} = \sum |I_{all}^{-\frac{1}{n}} - y|.$$
4. $-\frac{1}{n}-\Delta$ とし、1.に戻る． $\Delta = 0.0001$.

この結果得られた乗数 $-\frac{1}{n}$ と I_{all} の線形化誤差の関係を図7.3に示す．同図より、 $\frac{1}{n} = 0.8455$ において線形化誤差は最小値をとる． $\frac{1}{n} = 0.8455$ を用いて $I_{all}^{-\frac{1}{n}}$ を計算した結果を図7.4に示す．同図より、 $I_{all}^{-\frac{1}{n}}$ は距離 d に対し線形に増加しており、望ましい結果が得られている．従って、近似式のパラメータには、 $\frac{1}{n} = 0.8455$ の逆数である $n = 1.183$ を使用する．

次に、反射率・変換係数 αk とオフセット距離 d_o を同定するために、線形化した $I_{all}^{-\frac{1}{n}}$ に最小二乗法を適用し、直線の傾き a と切片 b を計算する．この直線

パラメータ a, b は, $a = (\alpha k)^{-\frac{1}{n}}, b = (\alpha k)^{-\frac{1}{n}} d_o$ であることから, 式 (7.13), (7.14) で $\alpha k, d_o$ を同定できる.

$$\alpha k = a^{-n} \quad (7.13)$$

$$d_o = \frac{b}{a} \quad (7.14)$$

各物体における直線パラメータ a, b と αk の同定結果を表 7.1 に示す. この中で, 標準反射板の直線パラメータ a, b から, オフセット距離 d_o を計算した結果, $d_o = 2.844$ が得られた. 図面上では接触面とフォトリフレクタ面の間の距離は 2.17 mm であることから, 同程度の値が得られている. そこで, $d_o = 2.844$ を近似式のパラメータに用いることにする.

以上の手順により, 距離出力 I_{all} の近似に必要なパラメータ $n (= 1.183)$, $d_o (= 2.844)$ と, 各物体における反射率・変換係数 αk を同定した.

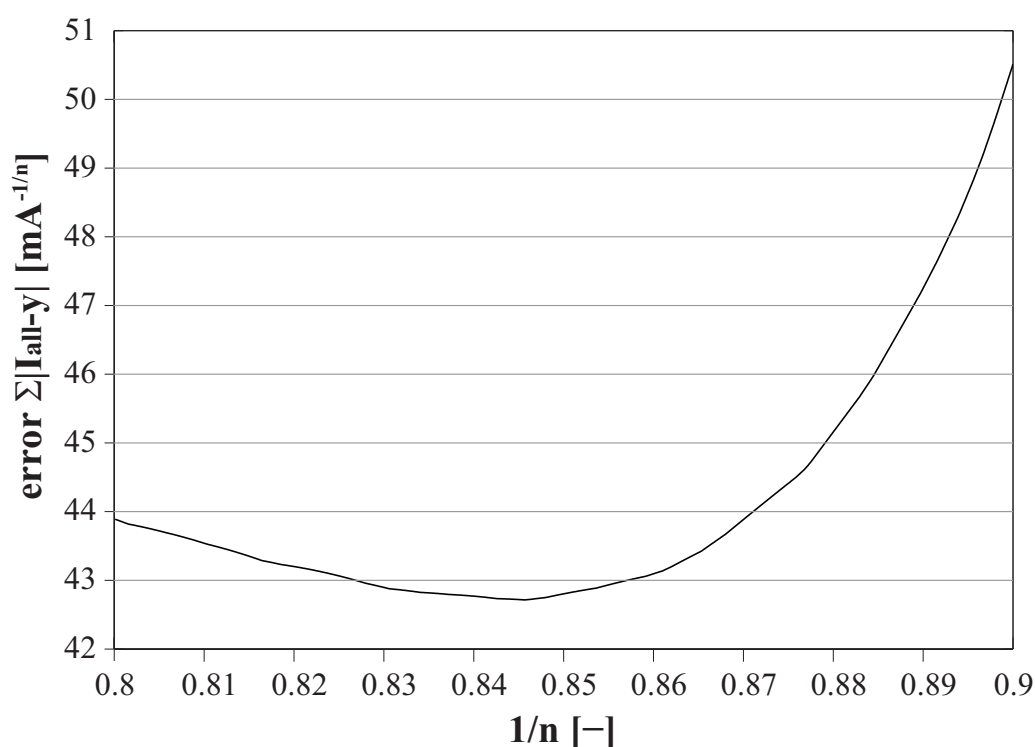


Fig. 7.3 Relation between linearization error and multiplier $\frac{1}{n}$

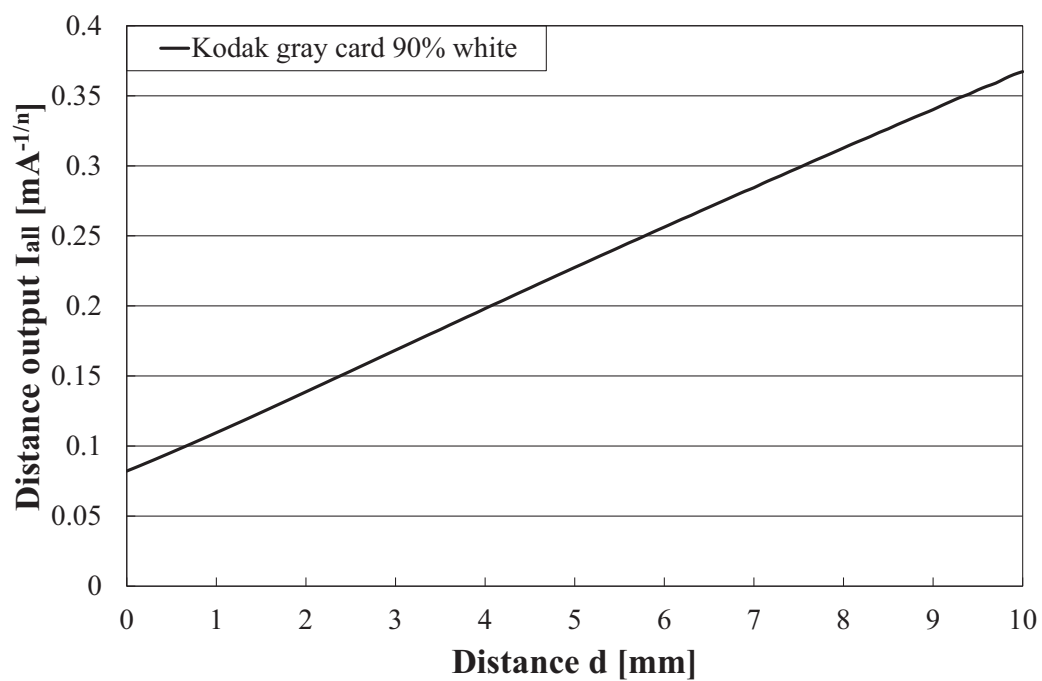


Fig. 7.4 Object: kodak gray card 90% white, linear distance output $I_{\text{all}}^{-1/n}$

Table 7.1 Parameter of linear equation a, b and reflectance · conversion factor αk

Object	gradients a	intercepts b	reflectance αk
Kodak gray card 90% white	0.0288	0.0819	66.33
Red paper	0.0319	0.0909	58.78
Blue paper	0.0346	0.1030	53.39
Black paper	0.4518	1.051	2.559
Painting 1	0.0320	0.0846	58.56
Painting 2	0.0314	0.0862	59.88
Cookie box	0.0397	0.1059	45.38
Aluminum plate	0.0475	0.1452	36.71
Felt	0.1123	0.3365	13.27
Glass plate	1.007	0.7720	0.9924
Mirror	0.0359	0.1673	51.11
Cylinder $d = 31$ mm	0.0811	0.1642	19.50
Cylinder $d = 51$ mm	0.0620	0.1579	26.79
Cylinder $d = 78$ mm	0.0523	0.1483	32.76
Sphere $\Phi = 50$ mm	0.1053	0.3730	14.32
Sphere $\Phi = 80$ mm	0.0659	0.2470	24.92

7.1.3 近似式の誤差評価

得られたパラメータ $n(=1.183)$, $d_o(=2.844)$ と各物体における反射率・変換係数 αk を基に, 各距離での I_{all} の近似値を計算し, 実験値との比較を行った. I_{all} の近似値と実験値, その誤差を図7.5~7.20に示す. 各図は, 左が距離ごとの実験値と近似値であり, 右は実験値と近似値の間での近似誤差である. コダックグレーカード90% ホワイトや赤・青画用紙, アルミ板, フェルト生地, イラスト1・2, 円柱, 球では, 実験値と近似値がほぼ一致しており, その誤差は比較的小さい. 一方で, 黒画用紙, ガラス板, 鏡では, 比較的大きな近似誤差が生じており, 特にガラス板, 鏡の距離0mmにおける近似値は, 実験値を基準にするとそれぞれ最大で67%, または50%のずれがある.

黒画用紙とガラス板, 鏡における近似誤差の原因を明らかにするために, 距離出力 I_{all} の線形化の結果を調べた. 図7.21~7.23に黒画用紙とガラス板, 鏡における距離ごとの $I_{all}^{-\frac{1}{n}}$ を示す. これらの図より, 黒画用紙とガラス板, 鏡では, 良好な線形特性が得られていない. この結果から, 黒画用紙とガラス板, 鏡では, コダックグレーカード90%と比べて, 適切な線形化の乗数に変化している. さらに, 黒画用紙とガラス板での $I_{all}^{-\frac{1}{n}}$ は下に凸のカーブを描いているのに対し, 鏡での $I_{all}^{-\frac{1}{n}}$ の曲線は上に凸である. 従って, 適切な線形化の乗数に変化している原因としては, 2つの要因, 1) フォトリフレクタのコレクターエミッタ間の電圧条件の変化, 2) 物体の反射特性の違いの影響, があると考えられる.

まず1)については, 黒画用紙とガラス板ではフォトリフレクタに流れる光電流が極めて小さくなることで, 抵抗回路網での電圧降下が減少し, 素子のコレクターエミッタ間の電圧条件がコダックグレーカード90% ホワイトの場合と比べて変化する. これにより, フォトリフレクタの距離—光電流特性が変化し, 距離出力 I_{all} の線形化のための適切な乗数に変化すると考えられる.

また2)に関しては, 鏡は鏡面反射成分が支配的であるが, コダックグレーカード90% ホワイトは拡散反射成分が支配的であり, 表面の光の反射特性は大きく異なる. これにより, 鏡と標準反射板では, 適切な乗数 n が変化する.

ると考えられる．

以上の結果より，一定パラメータ n, d_o による近似式(7.7)では，反射率が極端に小さい物体や鏡面反射成分が支配的な物体を精度よく近似することは難しい．ただし，拡散反射特性が強い物体群に対しては，反射率が最も大きい物体での I_{all} 出力より，近似式のパラメータ n, d_o を同定することで，良好な近似が可能である．

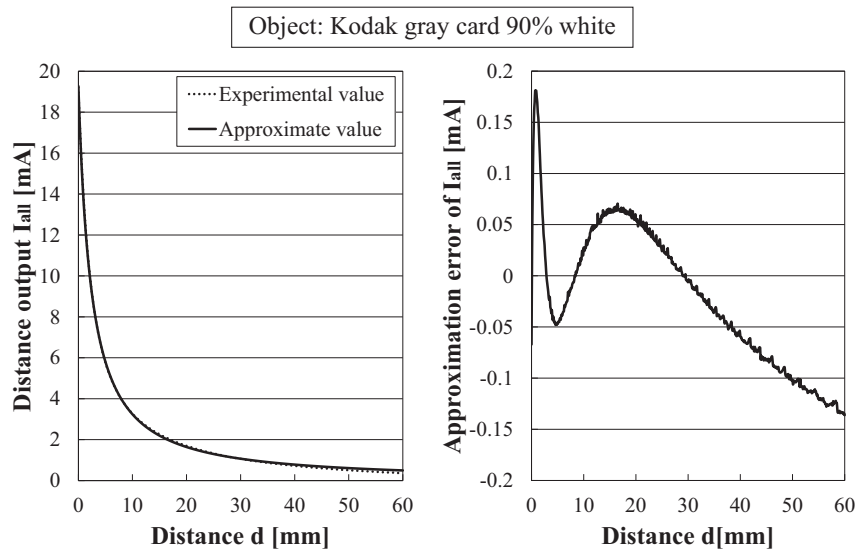


Fig. 7.5 Object: Kodak gray card 90% white, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve

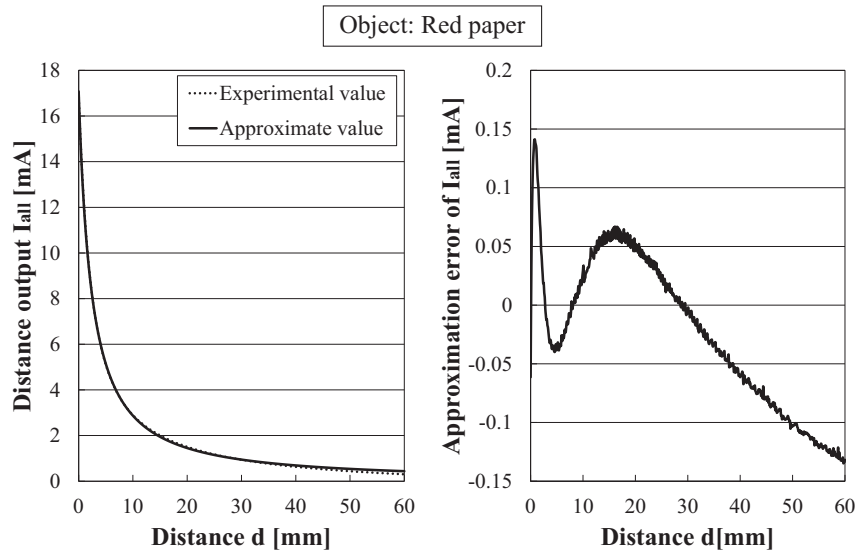


Fig. 7.6 Object: Red paper, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve

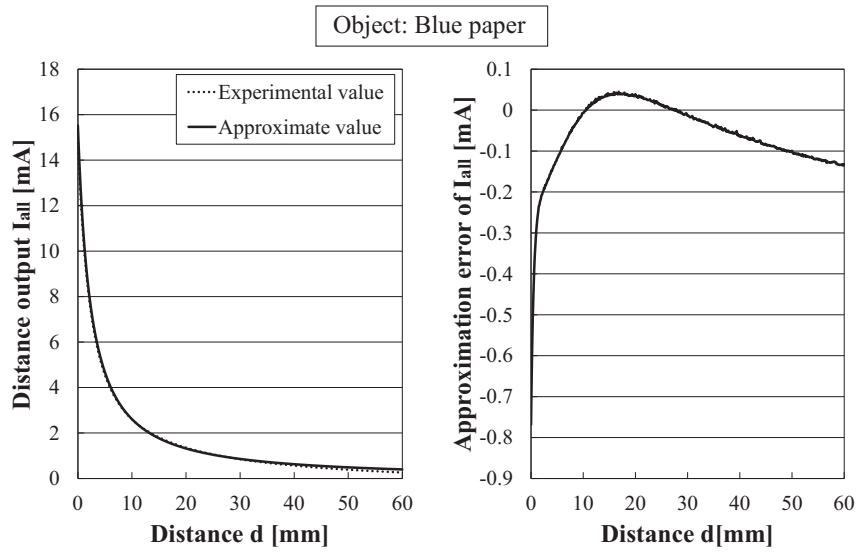


Fig. 7.7 Object: Blue paper, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve

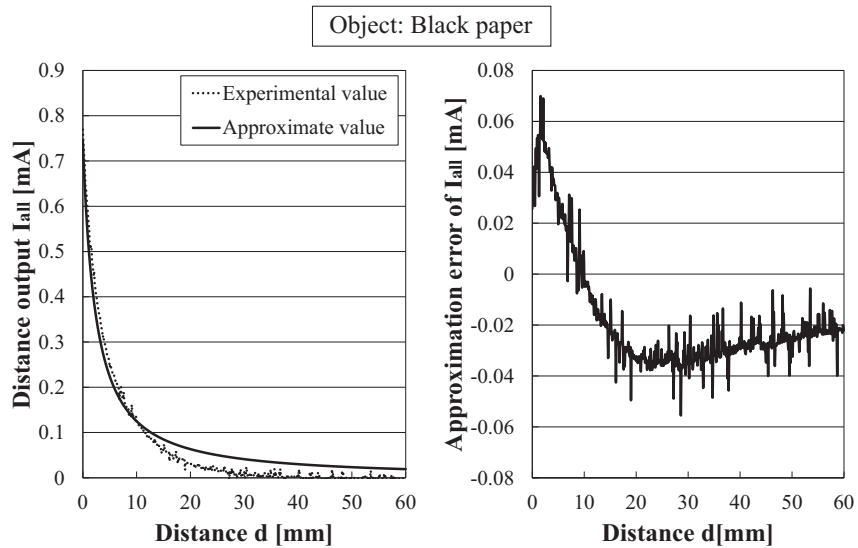


Fig. 7.8 Object: Black paper, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve

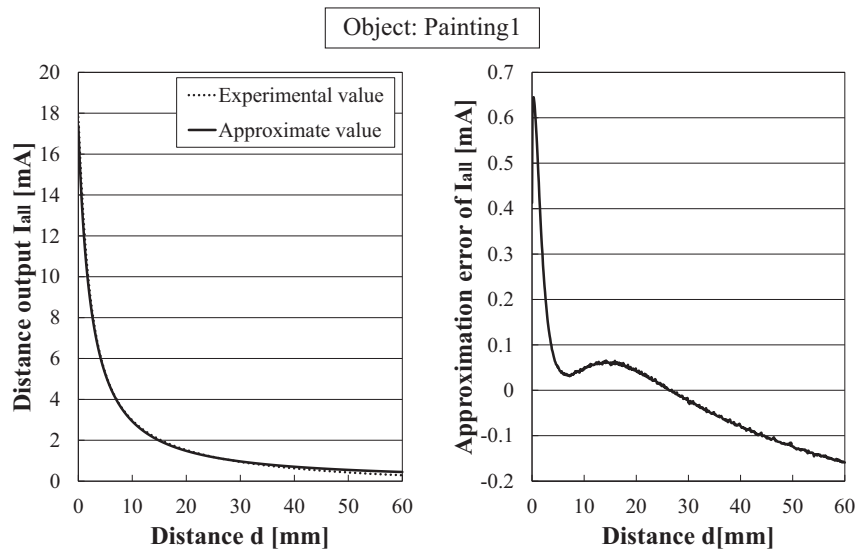


Fig. 7.9 Object: Painting 1, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve

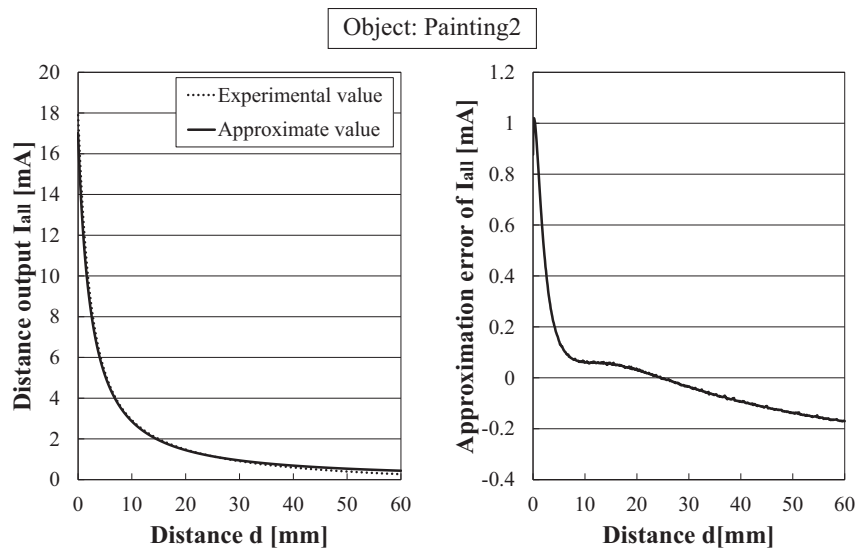


Fig. 7.10 Object: Painting 2, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve

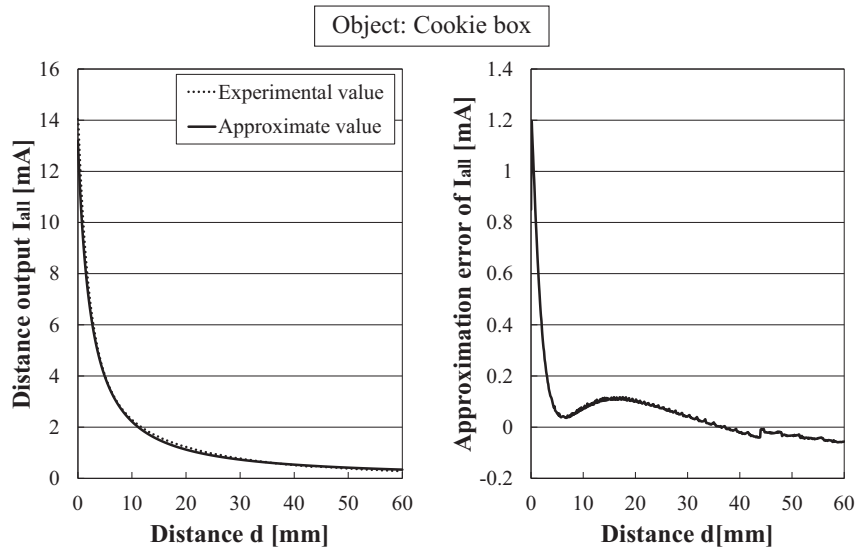


Fig. 7.11 Object: Cookie box, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve

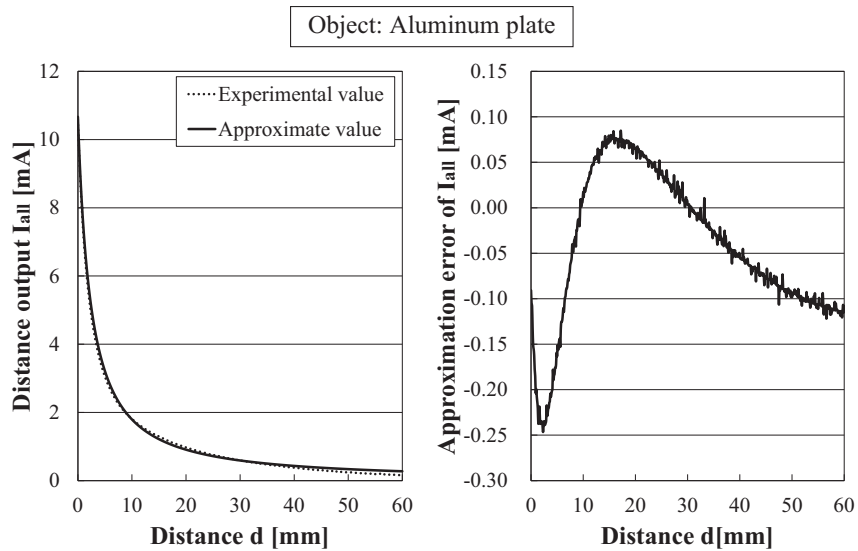


Fig. 7.12 Object: Aluminum plate, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve

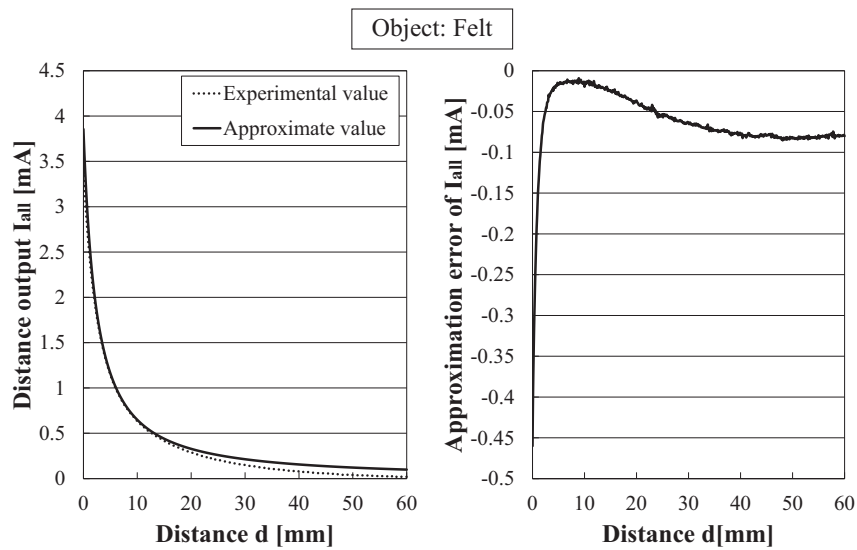


Fig. 7.13 Object: Felt, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve

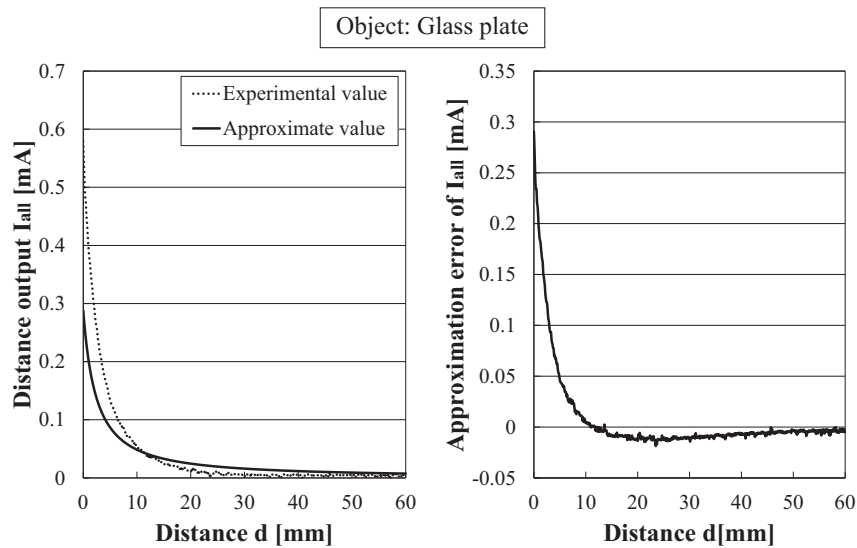


Fig. 7.14 Object: Glass plate, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve

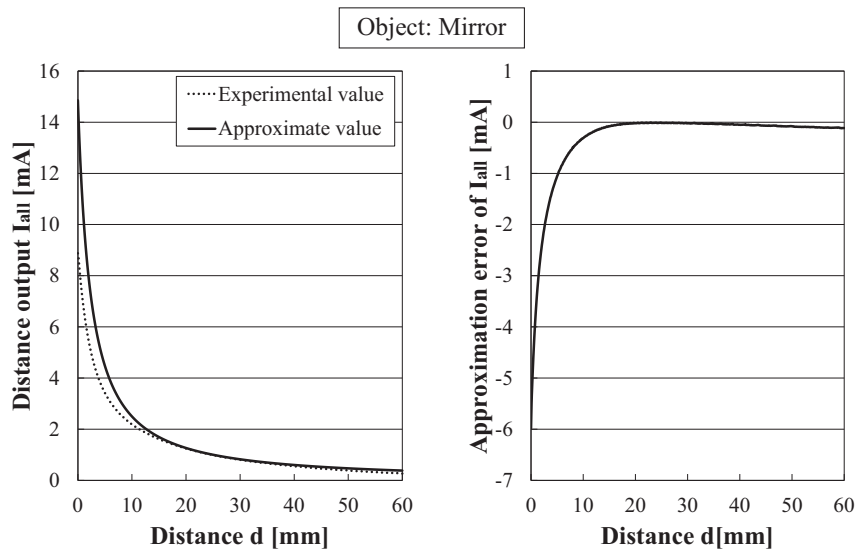


Fig. 7.15 Object: Mirror, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve

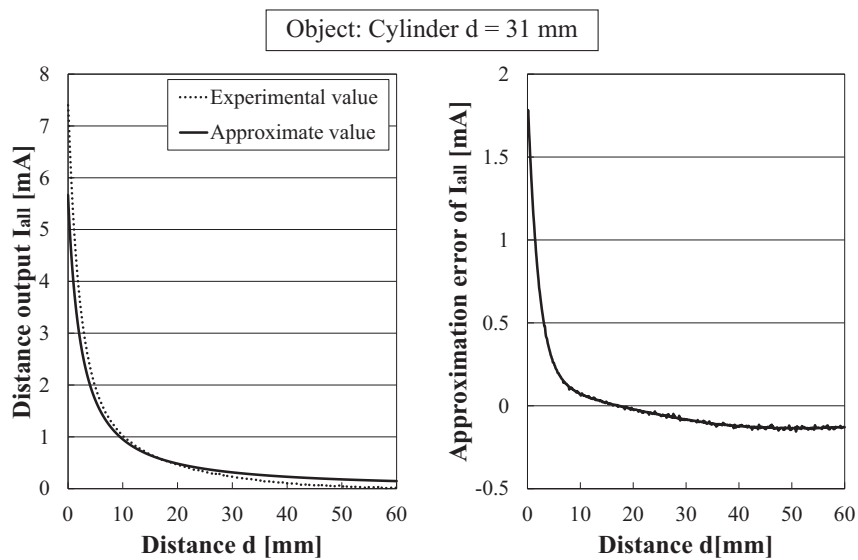


Fig. 7.16 Object: Cylinder $d = 31$ mm, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve

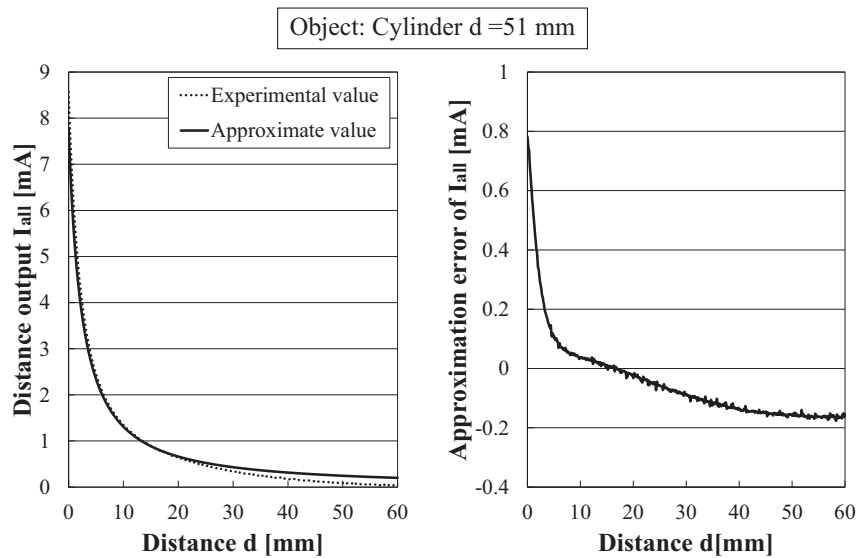


Fig. 7.17 Object: Cylinder $d = 51$ mm, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve

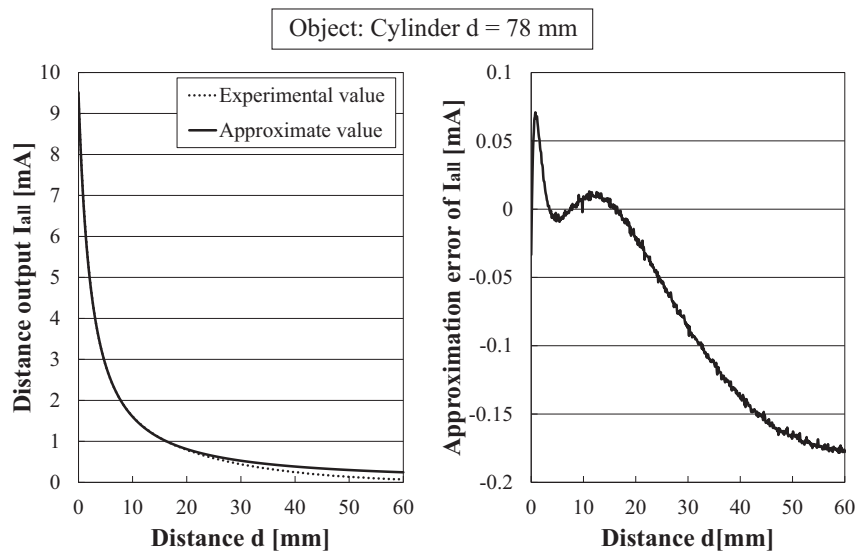


Fig. 7.18 Object: Cylinder $d = 78$ mm, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve

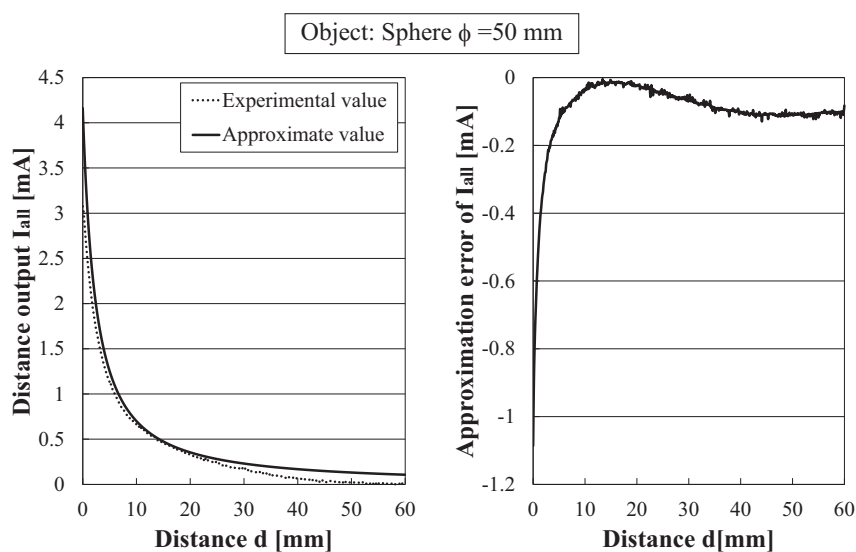


Fig. 7.19 Object: Sphere $\Phi = 50$ mm, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve

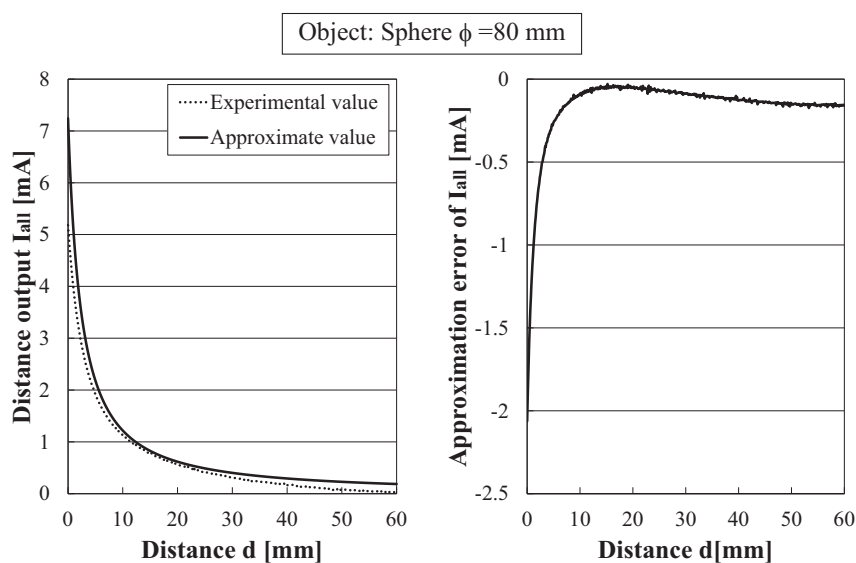


Fig. 7.20 Object: Sphere $\Phi = 80$ mm, (Left) Approximate curve and experimental curve of distance output I_{all} , (Right) error curve between approximate curve and experimental curve

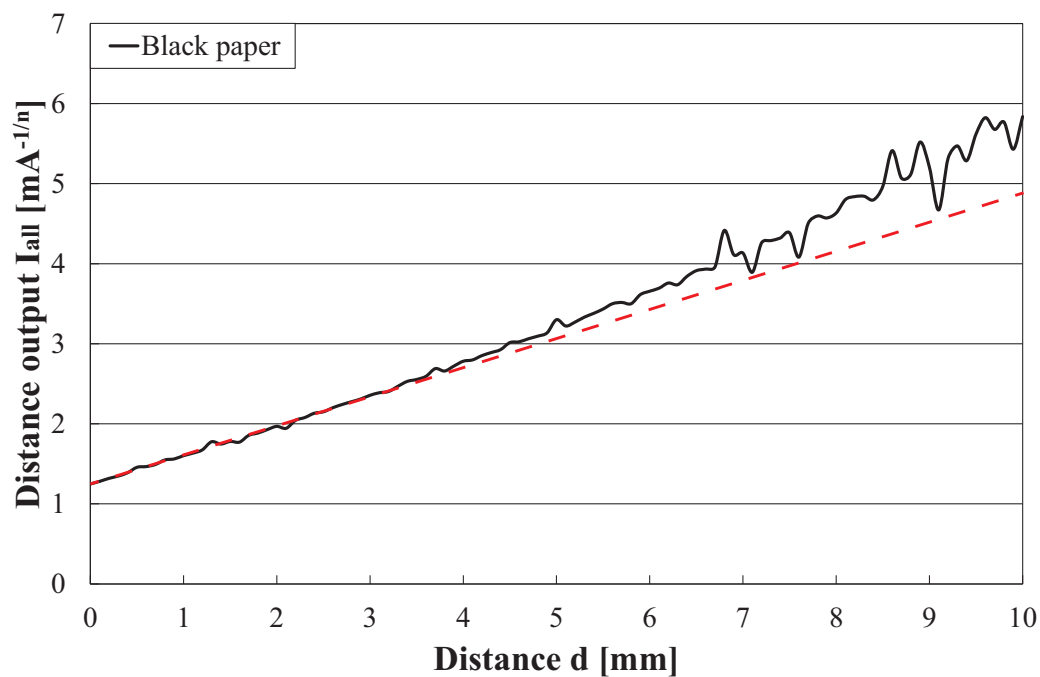


Fig. 7.21 Object: Black paper, linear distance output $I_{\text{all}}^{-1/n}$

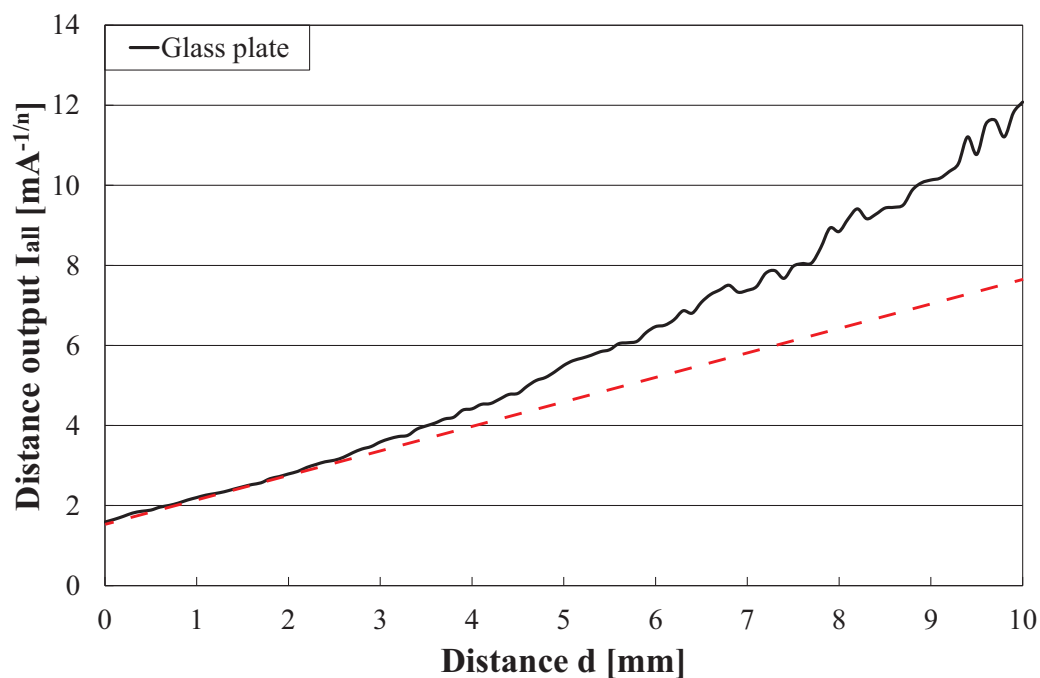


Fig. 7.22 Object: Glass plate, linear distance output $I_{\text{all}}^{-1/n}$

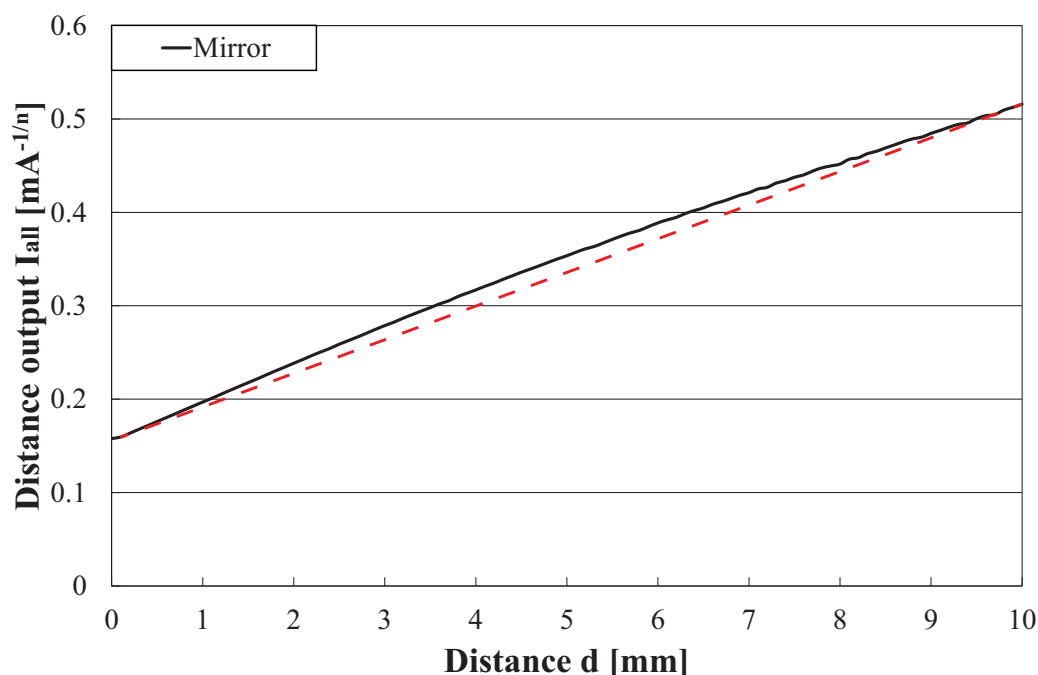


Fig. 7.23 Object: Mirror, linear distance output $I_{\text{all}}^{-\frac{1}{n}}$

7.1.4 絶対距離推定の誤差評価

次に，距離推定式 (7.11) に各物体での距離出力 I_{all} と反射率・変換係数 αk を代入し，実距離と距離推定値との誤差を検証した．各物体ごとの結果を図 7.24~7.28 に示す．図 7.24 はコダックグレーカード 90% ホワイトと赤・青・黒画用紙での結果であり，図 7.25 はイラスト 1・2 と菓子箱，図 7.26 はアルミ板，鏡，フェルトとガラス板における結果である．また，図 7.27 は 3 種類の円柱，図 7.28 は 2 種類の球での結果である．なお，各グラフには，触・すべり覚センサの厚み 2mm の位置に赤線をプロットしてある．実際の把持においては，距離 2mm 以内は触・すべり覚センサと物体が接触した状態である．従って，距離 2mm 以降での推定誤差が重要となる．表 7.2 に距離 2mm での実距離と推定距離との誤差を示す．

同表より，色の異なる対象物（図 7.24）の中では，コダックグレーカード 90% ホワイトと赤・青画用紙の結果が誤差 0.1mm 以内と比較的小さい．一方で，黒画用紙では誤差 -0.49mm と比較的大きな誤差が生じている．コダックグ

レーカード90% ホワイトでの I_{all} 値を基準にすると黒画用紙の I_{all} 値は4% 程度と非常に小さいことから，色の異なる物体に関しては，誤差 -0.49 mm 程度で近似が可能であると考えられる．

模様の異なる対象物（図7.25）では，誤差はほぼ同程度であり，イラスト1で -0.13 mm ，イラスト2と菓子箱で誤差 -0.23 mm である．

材質が異なる物体（図7.26）では，アルミ板とフェルト生地で誤差が比較的小さく，それぞれ 0.18 mm ， 0.13 mm である．アルミ板とフェルト生地で誤差が同程度である理由は，フェルト生地は拡散反射成分が支配的であり，アルミ板も表面処理（白アルマイト加工）により，鏡面反射成分が減少し，拡散反射成分が強まっているためと考えられる．一方で，ガラス板と鏡では非常に大きな誤差が生じており，それぞれ -2.1 mm ， 1.8 mm である．これは，7.1.3 節ですでに述べた通り，近似式のパラメータ n の適切な値がコダックグレーカード90% ホワイトとガラス板，鏡とで異なるためである．

3種類の円柱と2種類の球では，直径が小さくなるほど誤差が増大しており，直径 31 mm の円柱で -0.86 mm ，直径 50 mm の球で 0.67 mm の誤差が生じている．本論文で用いる指先の幅は 24 mm であることから，仮に対象物のサイズが指先幅の2倍程度 ($> 48\text{ mm}$) であると仮定すると，円柱に関しては最大 -0.31 mm ，球では最大 0.67 mm 程度の誤差で近似が可能であると考えられる．

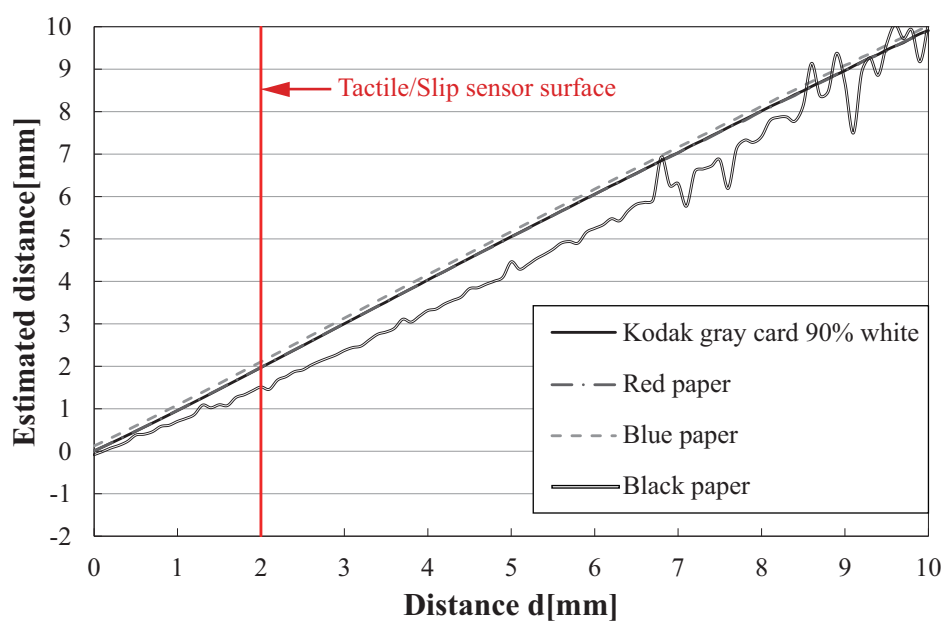


Fig. 7.24 Results of calibration of distance output I_{all} (Objects are kodak gray card 90% white, red paper, blue paper and black paper)

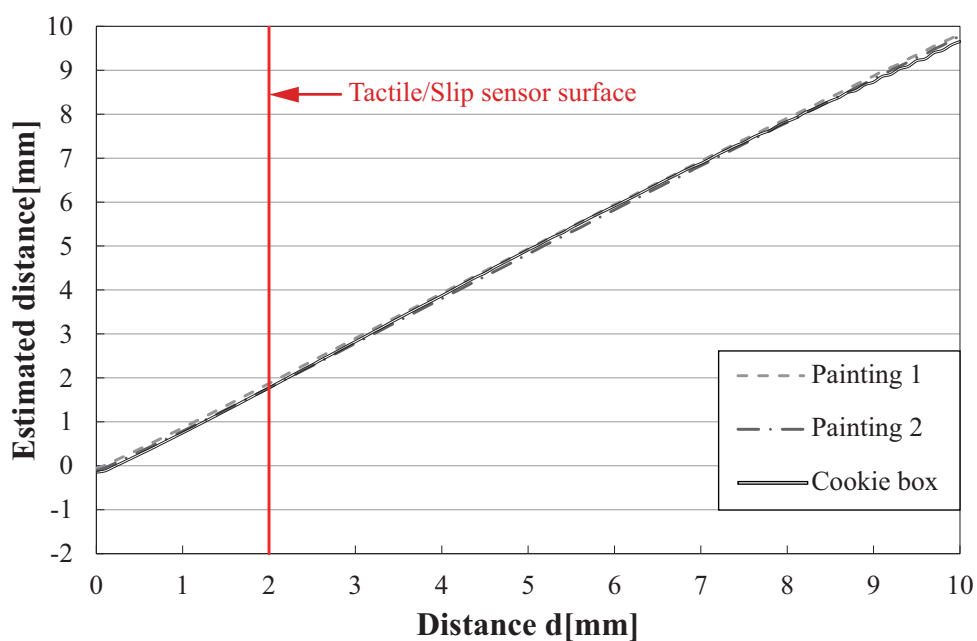


Fig. 7.25 Results of calibration of distance output I_{all} (Objects are painting 1, painting 2 and cookie box)

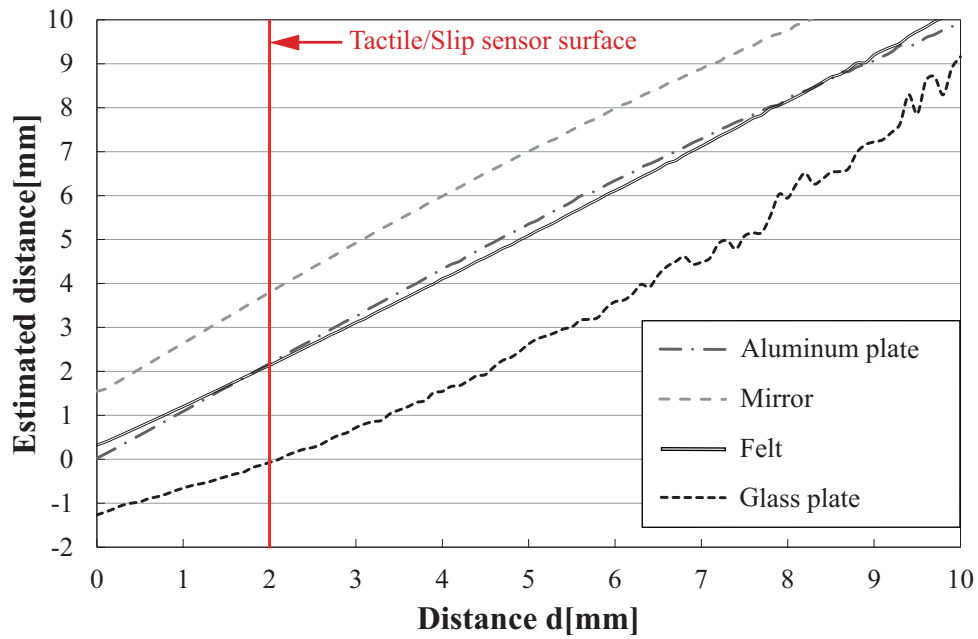


Fig. 7.26 Results of calibration of distance output I_{all} (Objects are aluminum plate, mirror, felt and glass plate)

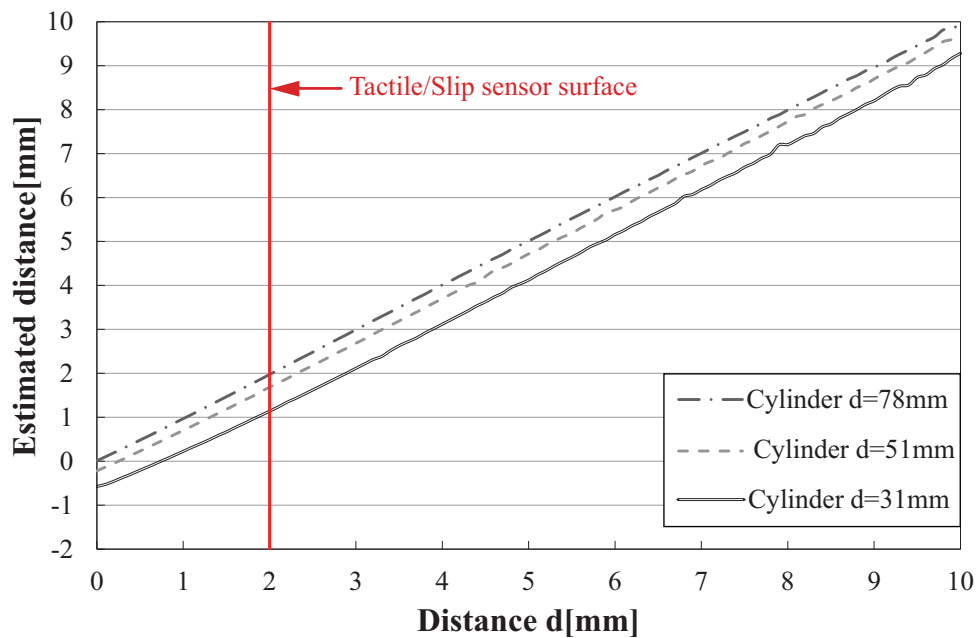


Fig. 7.27 Results of calibration of distance output I_{all} (Objects are Cylinder $d = 78$ mm, 51 mm and 31 mm)

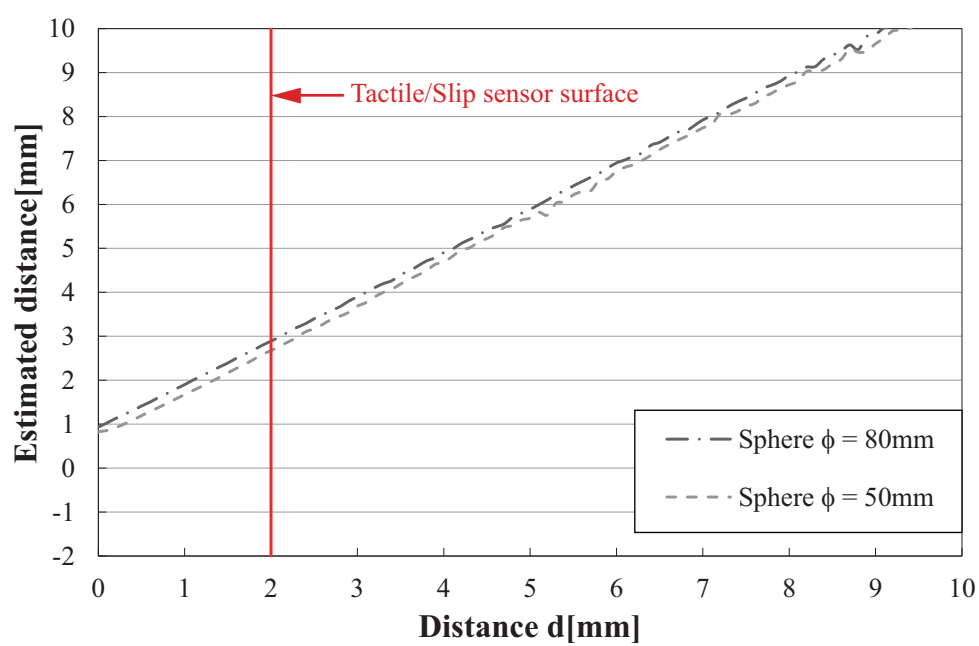


Fig. 7.28 Results of calibration of distance output I_{all} (Objects are sphere $\Phi = 80\text{ mm}$ and 50 mm)

Table 7.2 Estimated error of distance at $d = 2$ mm

Object	Estimated error of distance
Kodak gray card 90% white	-0.03
Red paper	-0.02
Blue paper	0.10
Black paper	-0.49
Painting 1	-0.13
Painting 2	-0.23
Cookie box	-0.23
Aluminum plate	0.18
Felt	0.13
Glass plate	-2.1
Mirror	1.8
Cylinder $d = 31$ mm	-0.86
Cylinder $d = 51$ mm	-0.31
Cylinder $d = 78$ mm	-0.03
Sphere $\Phi = 50$ mm	0.67
Sphere $\Phi = 80$ mm	0.89

7.1.5 全指同時接触での把持実験

本節では，反射率推定に基づく絶対距離制御の応用例として，3つの把持面の反射率がそれぞれ異なる対象物に対する全指同時接触での把持を示す．反射率推定により，各物体面に対し，物体一指先間の絶対距離を等距離に調整し，その後，等速で全指先を動作させることで，全指を同時に接触させて物体を把持する．この把持手法は，例えば，重量が軽い物体や重心位置が比較的高い物体等を把持する際に，その位置をずらさずに把持可能となるため，物体の転倒や押し出しによる把持失敗の防止に役立つ．以降では，把持制御と実験装置，把持実験の結果について説明する．

実験装置

実験装置を図7.29に示す．ロボットハンド掌の直下に三角柱の形状の対象物を設置し，これに対し各指の絶対距離の調整と把持を行った．対象物の3側面にはそれぞれシート状の圧力センサ(FSR406: INTERLINK ELECTRONICS 社製)が実装されており，物体と指先との接触力を計測可能である．なお，この圧力センサは最小16g重の接触力を検知できる．また，表面の反射率を各面で異なる値とするために，明度が異なる3種類のコピー用紙を3側面の圧力センサ上に貼り付けた．距離0mmにおける各面での距離出力 I_{all} と相対反射率を表7.3に示す．標準反射板の反射率を100%とすると，相対的な反射率は面1で44.2%，面2で76.1%，面3で31.9%である．

Table 7.3 Maximum distance output and relative reflectance at each surface of target object (relative reflectance: compared with kodak gray card 90% white))

	surface 1	surface 2	surface 3
Distance output I_{all} [mA]	5.53	9.51	3.99
Relative reflectance [%]	44.2	76.1	31.9

制御方式

全体の制御の流れとしては、まず、1) プリグラスプ制御と反射率推定により、物体面との距離を0mmに調整し、その後、2) 全指先を等速度で動作させて物体を把持する。なお、距離出力 $I_{\text{all}} = I_{\text{all}d=0}$ を収束条件として、1) から2) の制御に切り替える。

具体的には、プリグラスプ制御には独立制御方式を採用し、推定値 $I_{\text{all}d=0}$ を目標値 I_{ref} として距離を制御する。制御式を式(7.15)~(7.17)に示す。

$$\theta_{1\text{-ref}} = \theta_{1\text{-initial}} + K_1 \int (I_{\text{all}d=0} - I_{\text{all}}) dt \quad (7.15)$$

$$\theta_{2\text{-ref}} = \theta_{2\text{-initial}} + K_2 \int (x_c) dt \quad (7.16)$$

$$\theta_{p\text{-ref}} = \theta_{p\text{-initial}} + K_3 \int (y_c) dt \quad (7.17)$$

ただし、制御開始時点では反射率推定値は存在しないため、 $I_{\text{all}d=0}$ には物体と衝突しない範囲で適当な初期値を設定する必要がある。表7.3より、距離0mmでの I_{all} の最小値は面3の3.99mAであるため、 I_{ref} の初期値はこの値よりも小さい2.0mAとした。この初期値から制御を開始し、距離出力 I_{all} が0.1mA増加する度に反射率を推定を行い、 $I_{\text{all}d=0}$ を更新し、物体との距離制御を行った。

実験結果

距離出力 I_{all} が推定した $I_{\text{all}d=0}$ に収束した時点で撮影した写真が図7.30である。プリグラスプを開始してから約1.5s程度で写真の指先位置に収束した。次に、各指先根元の関節 θ_1 を一定速度 (5.0 deg/s) で動作させて把持を行った。各面の圧力センサ値が閾値を超えた時点での物体と指先との間の距離を0mmと定義すると、順運動学により計算した物体との距離は1) プリグラスプ制御の時点では、それぞれ、面1と指1との間で0.61mmであり、面2と指先2との間で0.49mm、面3と指先3との間で0.19mmであった。従って、最大0.61mmの誤差で絶対距離の調整が実現できている。

1) プリグラスプ制御を開始してからの対象物側の圧力センサの時間変化を図7.31に示す。横軸が1) プリグラスプ制御を開始してからの経過時間、縦

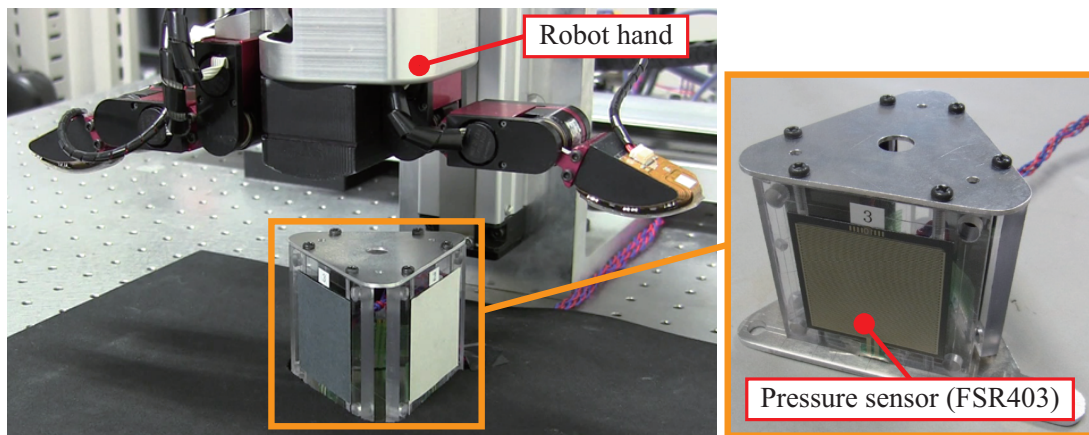


Fig. 7.29 Experimental apparatus for evaluating contact timing of 3 fingers

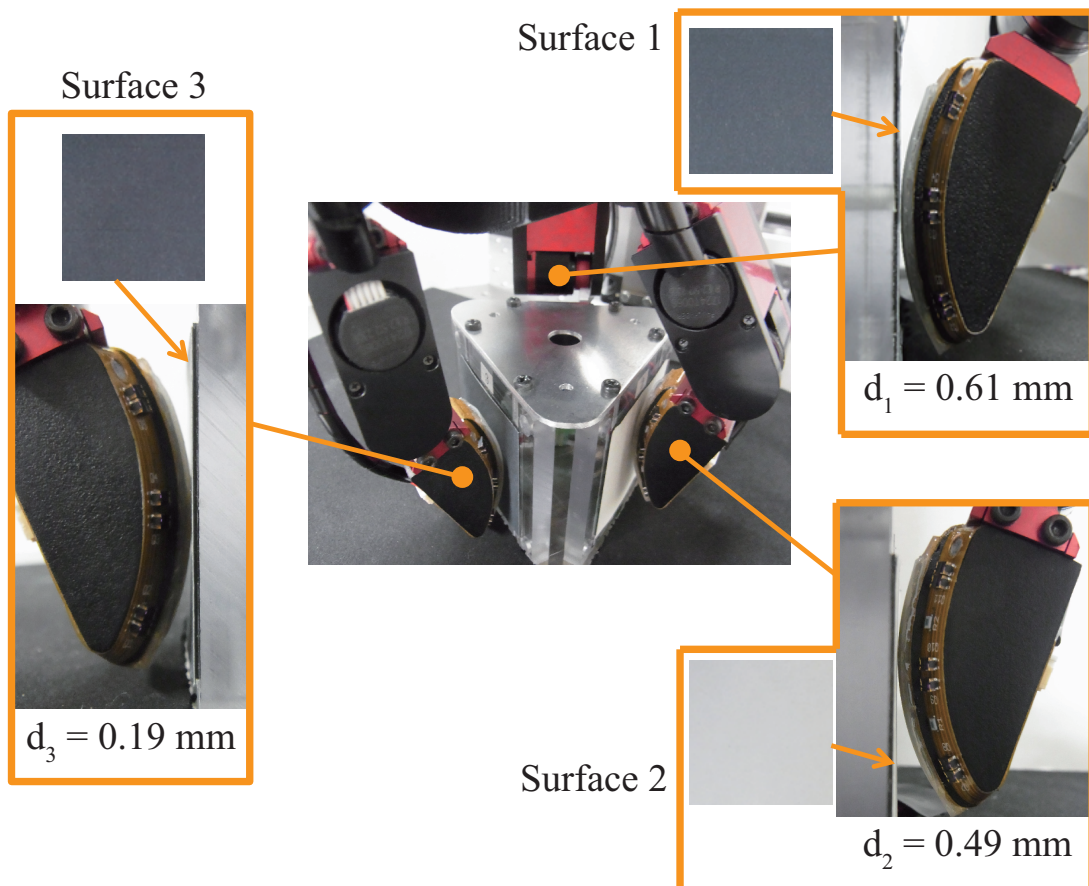


Fig. 7.30 Result of pre-grasp using sensor output calibration

軸は圧力センサの電圧値である．グラフの3つの線は各側面それぞれの圧力センサの出力電圧の変化を示している．制御開始から1.5s程度の時間で3つの圧力センサが全て反応しており，0.056sという比較的短い時間内に全てのセンサ出力が立ち上がっている．

以上の結果から，反射率推定に基づく絶対距離制御により，物体との距離0mmに対し，最大0.61mmの誤差で，アプローチすることが可能であり，これにより，全指を0.056s以内の短い時間内で，ほぼ同時に接触させて把持することが可能である．

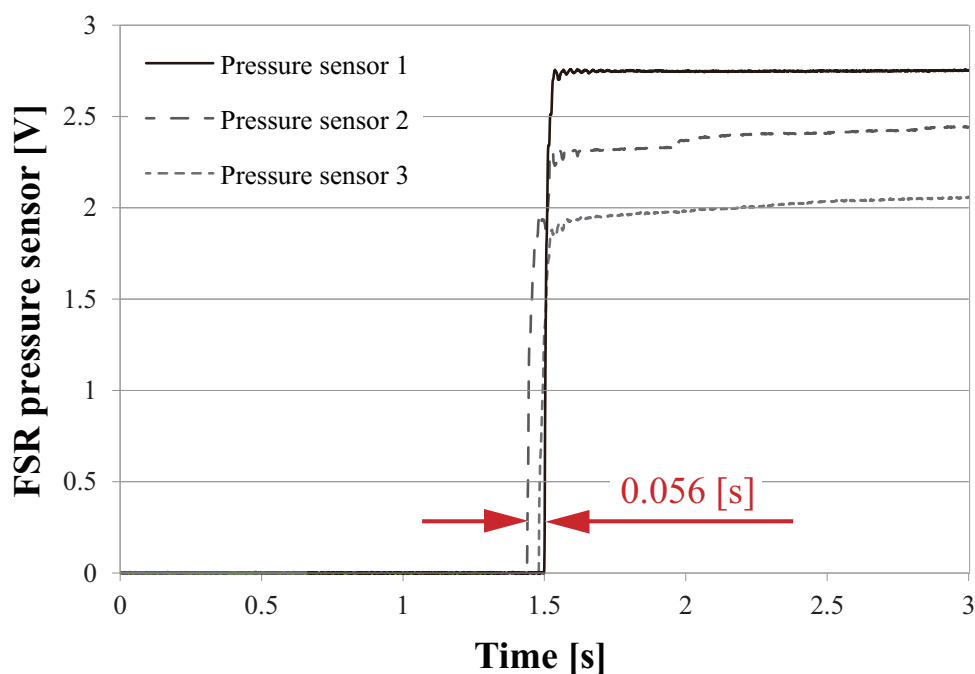


Fig. 7.31 This graph shows that pressure sensor outputs of the object (carried out the pre-grasp and the grasping of it).

7.2 相対速度制御

絶対距離制御では反射率推定を利用したが、この推定は物体と指先間の相対移動距離を計測する必要があるため、動的物体には適用できない欠点がある。また、制御式の距離目標値 I_{ref} に物体と衝突しない値をあらかじめ設定する必要がある、初期値に依存する問題もある。

そこで、相対速度制御では、対象物と衝突するまでの残り時間を推定する仕組み“Time-to-contact”を利用して上記2つの問題点を解消する。Time-to-contactは、人間を始め、多くの生物が利用している視覚情報であり、対象物の色や模様、寸法に依存せず計測可能という特徴を持つ。

本節では、Time-to-contact(TTC)の計測原理を述べた後、近接覚センサ出力に基づくTTCの推定手法と把持制御への応用について述べる。

7.2.1 Time-to-contact(TTC)の計測原理

TTCの計測原理を説明するにあたり、海鳥（カツオドリ）を例に挙げる。海鳥は海面に飛び込んで魚を捕獲する際、翼を傷めないように、海面と接触間近で翼を畳むことが知られている。この際に利用しているのがTTCであり、視覚に映る対象物や背景の動きの変化（オプティカルフロー）より衝

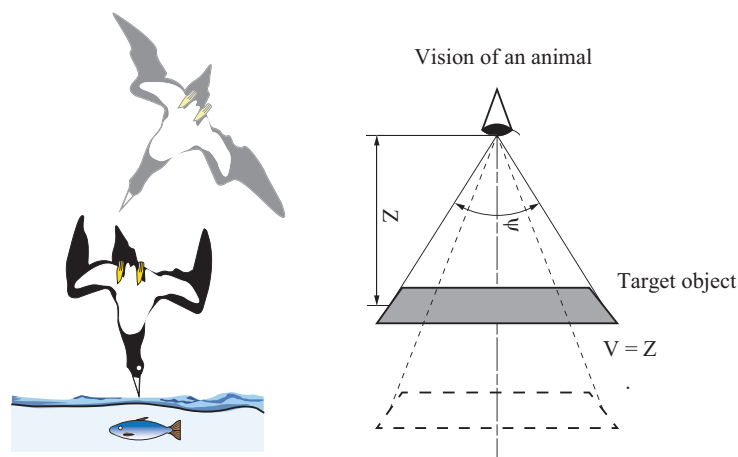


Fig. 7.32 Example of detecting TTC from visual information in the case of a bird.

突までの残り時間を予測する^[82, 83]. 図7.32に示す通り, 視覚に映る対象物の画角を ψ , その時間変化を $\dot{\psi}$ とすると, TTCは次式で表現できる.

$$\tau = -\frac{Z}{\dot{Z}} = \frac{\psi}{\dot{\psi}} \quad (7.18)$$

なお, Z は対象との距離であり, \dot{Z} は相対速度である. TTCはオプティカルフローを用いるため, 物体の寸法や表面性状の影響を受けないメリットがある.

また, TTCは, 距離 Z とセンサ出力 $f(Z)$ の関数が既知であれば, $f(Z)$ に基づき衝突時間の推定が可能である. そこで, 近接覚センサの距離出力 I_{all} の近似式(7.7)を左辺 $d+d_0$ に変形し, $Z=d+d_0$ として, 式7.18に代入すると次式が得られる.

$$\tau = -\frac{Z}{\dot{Z}} = n \frac{I_{\text{all}}}{\dot{I}_{\text{all}}} \quad (7.19)$$

従って, ピッチ, ロール角 $(\phi, \theta) = (0, 0)$ においては, 距離出力 I_{all} からもTTC τ の推定が可能である.

7.2.2 把持制御への応用

TTCは反射率によらない情報ではあるものの, 以下2つの問題があり, そのまま相対速度制御に応用することは難しい.

1. センサ出力を微分することによる高周波ノイズの拡大
2. センサ静止時にTTCが無限大になる

そこで, 本論文では, 1)を解決するために, 応答速度とノイズカット性能を両立する微分フィルタ“First Order Adaptive windowing(FOAW)”^[80, 81]を用い, また2)については, TTCの逆数を用いることで, 相対速度制御を実現する. 以降では, まず微分フィルタFOAWを説明し, その後, TTCの逆数を用いた相対速度制御について述べる.

微分フィルタ：First Order Adaptive Windowing

TTC τ を計算するためには，距離出力の微分値 \dot{I}_{all} を計算する必要がある．一般的には，オイラー近似に基づき，現在のセンサ出力 $u(k)$ と Δt 秒前の出力 $u(k-1)$ を用いて，式(7.20)により微分値を計算する．

$$y(k) = \frac{u(k) - u(k-1)}{\Delta t} \quad (7.20)$$

ここで，2サンプルの間隔 Δt を n サンプル分長くすることで，センサ値のノイズによる微分値のバラつきを小さくできる．これは n サンプル分の微分値の平均を計算することと等価であり，微分値のバラつきを $1/n$ にする効果がある^[81]．しかしながら，サンプリングレートが低下することにより，センサ出力信号の高周波成分が減衰する問題がある．

そこで，微分フィルタ“First Order Adaptive Windowing (FOAW)^[81]”では，センサ出力の変化幅に応じて微分計算に使用するサンプル数を可変とすることで，微分値のバラつきを小さくし，かつ高周波成分の減衰量を低減する．

FOAWのブロック図を図7.33に示す．微分計算に使用する最大サンプル数は N_{max} であり，この範囲内で条件式に基づき，適切なサンプル数を決定する．

FOAWの計算手順をアルゴリズム1に示す． $u(k)$ が現在のセンサ出力値であり， $y(k)$ が微分計算結果である．なお， $u(0) = u(-1) = 0$ とする．ここで， C はセンサ出力の不確かさの幅であり，センサ出力の無限大ノルムとする．サンプル数を $n = 1 \sim N_{\text{max}}$ まで増加させて微分値を計算し，条件式 $\text{abs}(e) > C$ からはずれた時点で微分計算を打ち切る．この計算手順により，センサ出力の不確かさの幅 C 内に収まる複数のセンサ出力値から微分値を計算する．さらに，同アルゴリズムでは，複数サンプルから微分を計算する際に，最小二乗法を用いることで，より正確な微分値を計算する¹．

本論文では，FOAWを用いることにより，応答特性を維持しつつ，距離出力の微分値 \dot{I}_{all} のノイズを小さくし，正確なTTC τ の推定を行う．

¹文献^[81]では，2サンプルでの微分計算と区別するため，最小二乗法を用いる手法を“Best-fit FOAW”と呼んでいる

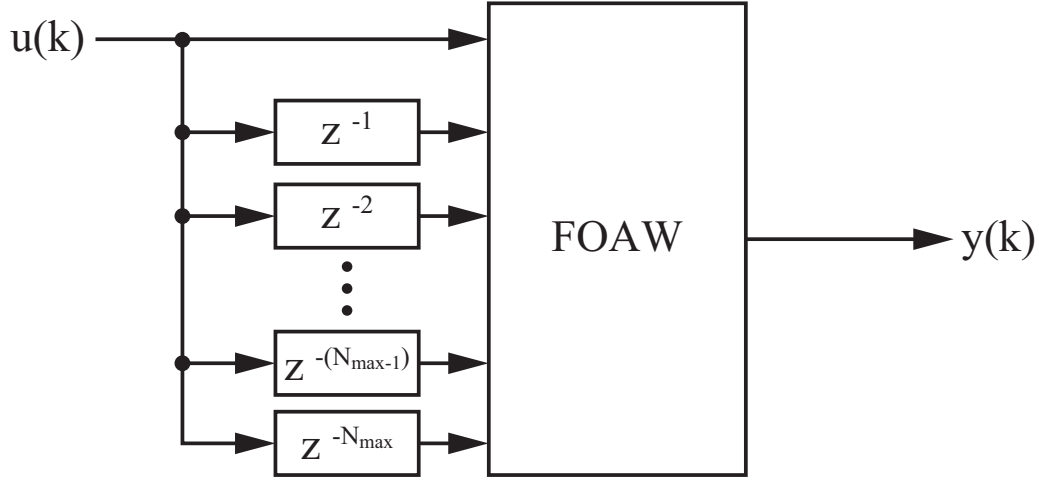


Fig. 7.33 Block diagram of First Order Adaptive Windowing (FOAW)

Algorithm 1 $y(k)$: output of Best-fit FOAW

for $n \in \{1, \dots, \min(k+1, N_{max})\}$ **do**
 $a = 0$
for $j \in \{1, \dots, n\}$ **do**
 $a = a + (n u(j+1) - 2j u(j+1))$
end for
 $a = a / (Tn(n+1)(n+2)/6)$
for $i \in \{1, \dots, n\}$ **do**
 $e = u(k-i) - u(k) + iTa$
if $\text{abs}(e) > C$ **then**

 RETURN $y(k) = a$
end if
end for
end for

 RETURN $y(k) = a$

TTCの逆数 $1/\tau$ を用いた減速制御

TTC τ は反射率に依存しない値であるものの，相対速度“0”で無限大の値をとるため，相対速度制御に直接利用することは難しい．そこで，本論文ではTTCの逆数 $1/\tau$ を用いる（式(7.21)）．

$$\frac{1}{\tau} = -\frac{\dot{d}}{d + d_o} = -\frac{d}{dt} \log (d + d_o) \quad (7.21)$$

$1/\tau$ は，物体との相対速度に比例し，距離に反比例して増大する．従って， $1/\tau$ を基に指先速度を減速することで，物体との相対速度と距離に応じた速度制御が可能となる．

$1/\tau$ を用いた指先の相対速度制御式を式(7.22)~(7.24)に示す．

$$\theta_{1-\text{ref}} = \theta_{1-\text{initial}} + \int \left(\dot{\theta}_{1-\text{max}} - \frac{\hat{K}_1}{\tau} \right) dt \quad (7.22)$$

$$\theta_{2-\text{ref}} = \theta_{2-\text{initial}} + K_2 \int (x_c) dt - \int \left(\dot{\theta}_{1-\text{max}} - \frac{\hat{K}_1}{\tau} \right) dt \quad (7.23)$$

$$\theta_{p-\text{ref}} = \theta_{p-\text{initial}} + K_3 \int (y_c) dt \quad (7.24)$$

ここで， $\theta_{1-\text{ref}}$ ， $\theta_{2-\text{ref}}$ ， $\theta_{p-\text{ref}}$ は各関節の角度制御系への指令値である．また， $\theta_{1-\text{initial}}$ ， $\theta_{2-\text{initial}}$ ， $\theta_{p-\text{initial}}$ は制御を開始した時点での初期関節角度であり， $\dot{\theta}_{1-\text{max}}$ は屈曲関節1の最大速度， \hat{K}_1 と K_2 ， K_3 は適当なゲインであり，これらは全て定数である．式(7.23)および，式(7.24)により，物体との姿勢を一定にし，式(7.22)により指先速度を制御する．この速度とゲイン \hat{K}_1 の関係を以下で導出する．

屈曲関節1の角速度 $\dot{\theta}_1$ とこの角度指令値変化 $\dot{\theta}_{1-\text{ref}}$ が良く一致し，かつ，位置出力 x_c, y_c を用いた姿勢制御により，ピッチ，ロール角 $(\phi, \theta) = (0, 0)$ を維持できるとすると，指先の並進方向の最大速度 \dot{d} は，式(7.25)で表される．

$$\dot{d} \geq -L_1 \dot{\theta}_{1-\text{ref}} \quad (7.25)$$

ここで， L_1 は屈曲関節1と2の間のリンク長である．式(7.22)の両辺を微分し，式(7.25)と式(7.21)を代入し， \dot{d} に関してまとめることで，以下の式(7.26)

が得られる．

$$\dot{d} \geq -\frac{\dot{\theta}_{1-\max} L_1 (d + d_o)}{d + d_o + \hat{K}_1 L_1} \quad (7.26)$$

さらに，式(7.26)に距離 $d = 0 \text{ mm}$ を代入することで，接触時の指先最大速度 \dot{d}_{contact} とゲイン \hat{K}_1 の関係式(7.27) が得られる．

$$\dot{d}_{\text{contact}} \geq -\frac{\dot{\theta}_{1-\max} L_1 d_o}{d_o + \hat{K}_1 L_1} \quad (7.27)$$

ここで， d_o, L_1 は一定値であるため，ゲイン \hat{K}_1 に適切な値を設定することで，接触時の指先最大速度の制限が可能である．具体的には，まず，屈曲関節1の最大角速度 $\dot{\theta}_{1-\max}$ と接触時の指先速度 \dot{d}_{contact} を設定し，式(7.28)を基にゲイン K_1 を決定する．

$$\hat{K}_1 = -d_o \frac{\dot{\theta}_{1-\max} L_1 + \dot{d}_{\text{contact}}}{\dot{d}_{\text{contact}} L_1} \quad (7.28)$$

Time-to-contact の逆数 $1/\tau$ 検出実験

距離出力 I_{all} から，物体表面の光の反射率によらず $1/\tau$ を推定可能か実験で検証した．実験装置を図7.34に示す．実験では，対象物とセンサを正対した姿勢で配置し，この姿勢でセンサを対象物に向かって一定速度で接近させた際の I_{all} を計測し，式(7.19)により $1/\tau$ を計算した．使用した対象物を図7.35に示す．物体表面の色や材質，形状の影響を検証するために，対象物は標準反射板(Kodak gray card 90% white)と，赤・青画用紙，アルミ板（白アルマイト加工），フェルト生地，球（ $\Phi = 50, 80 \text{ mm}$ ）を用いた．また，ノイズの影響を小さくし，かつ正確なTTCを計算するために， τ の計算にはFOAWを用いた．FOAWのパラメータである不確かさの帯域 C は“0.01”とし，最大サンプル数 N_{max} は“20”とした．

速度 30.0 mm/s ， 60.0 mm/s での Time-to-contact の逆数 $1/\tau$ の推定結果を図7.36, 7.37に示す．両図共に縦軸が $1/\tau$ であり，横軸が物体と指先との距離 d である．グラフ内の各線は，対象物ごとの結果を示している．また赤線は，Xステージの位置と速度から計算した $1/\tau$ の理想値である．

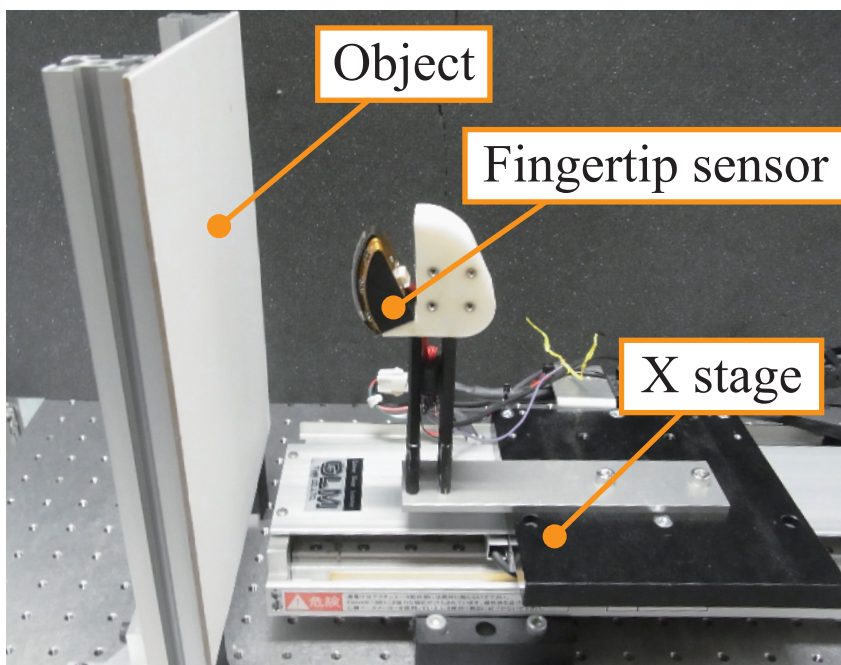


Fig. 7.34 Experimental apparatus for detecting $1/\tau$



Fig. 7.35 Objects used in the experiment of detecting $1/\tau$ (kodak gray card 90% white, aluminum plate, felt, red paper, black paper and spheres($\Phi = 50, 80$ mm))

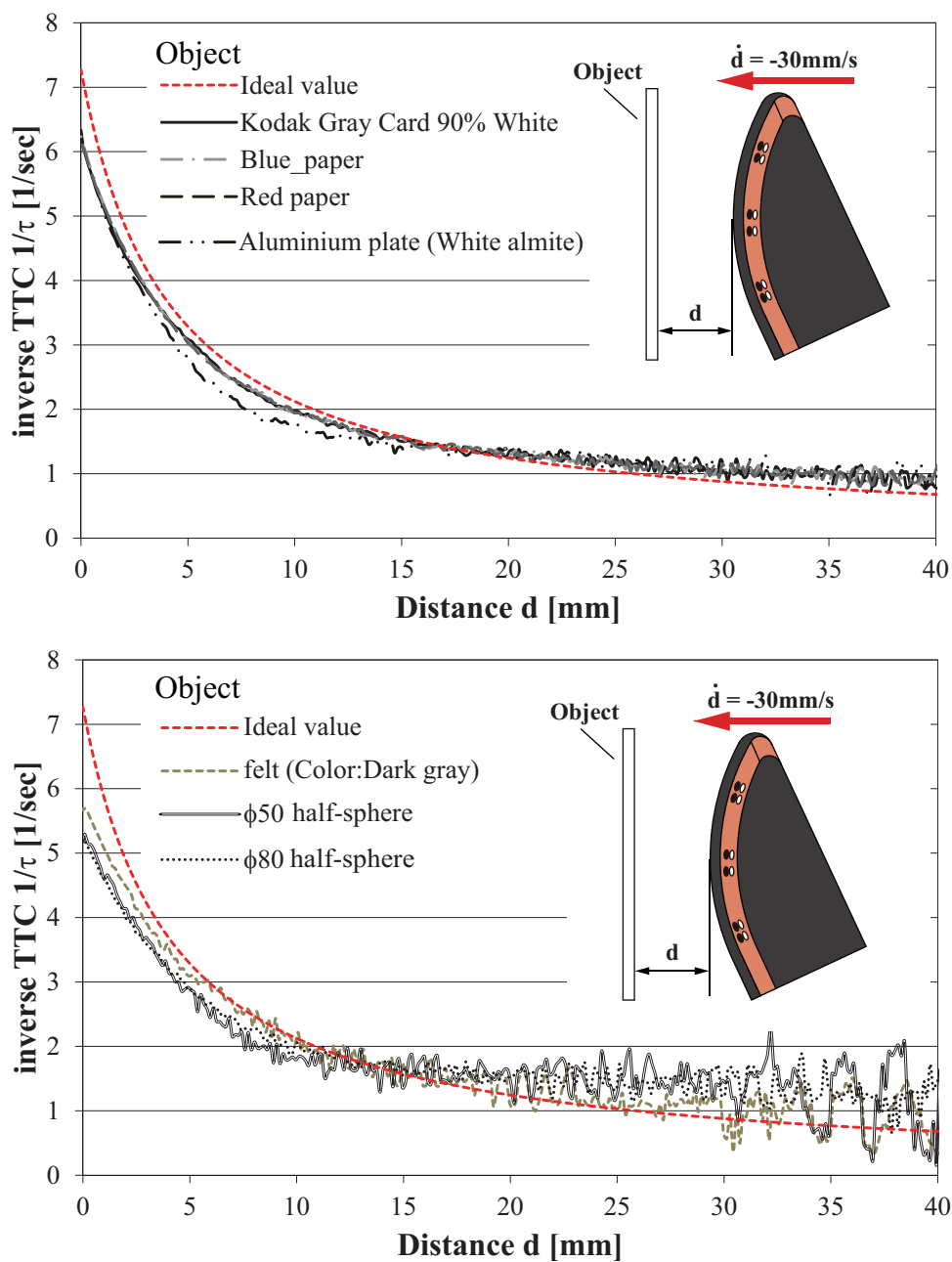


Fig. 7.36 Result of estimating $1/\tau$ at fingertip speed = 30.0 mm/s

両図より、 $1/\tau$ は、物体によらず、ほぼ同じ曲線で変化している。距離 30～40 mm では、ノイズにより出力が変動しているが、距離 30 mm 以内においては、変動が少なく各物体の値がよく一致している。ハンド指先の相対速度制御では、近距離から接触に至るまでの出力が特に重要であるため、

近距離でノイズの影響が少なく、また各物体で変動の小さいという点は望ましい特性である。さらに、距離出力 I_{all} から推定した $1/\tau$ は理想値に近い曲線を描いている。

以上より、距離出力 I_{all} から Time-to-contact の逆数 $1/\tau$ を推定可能である。

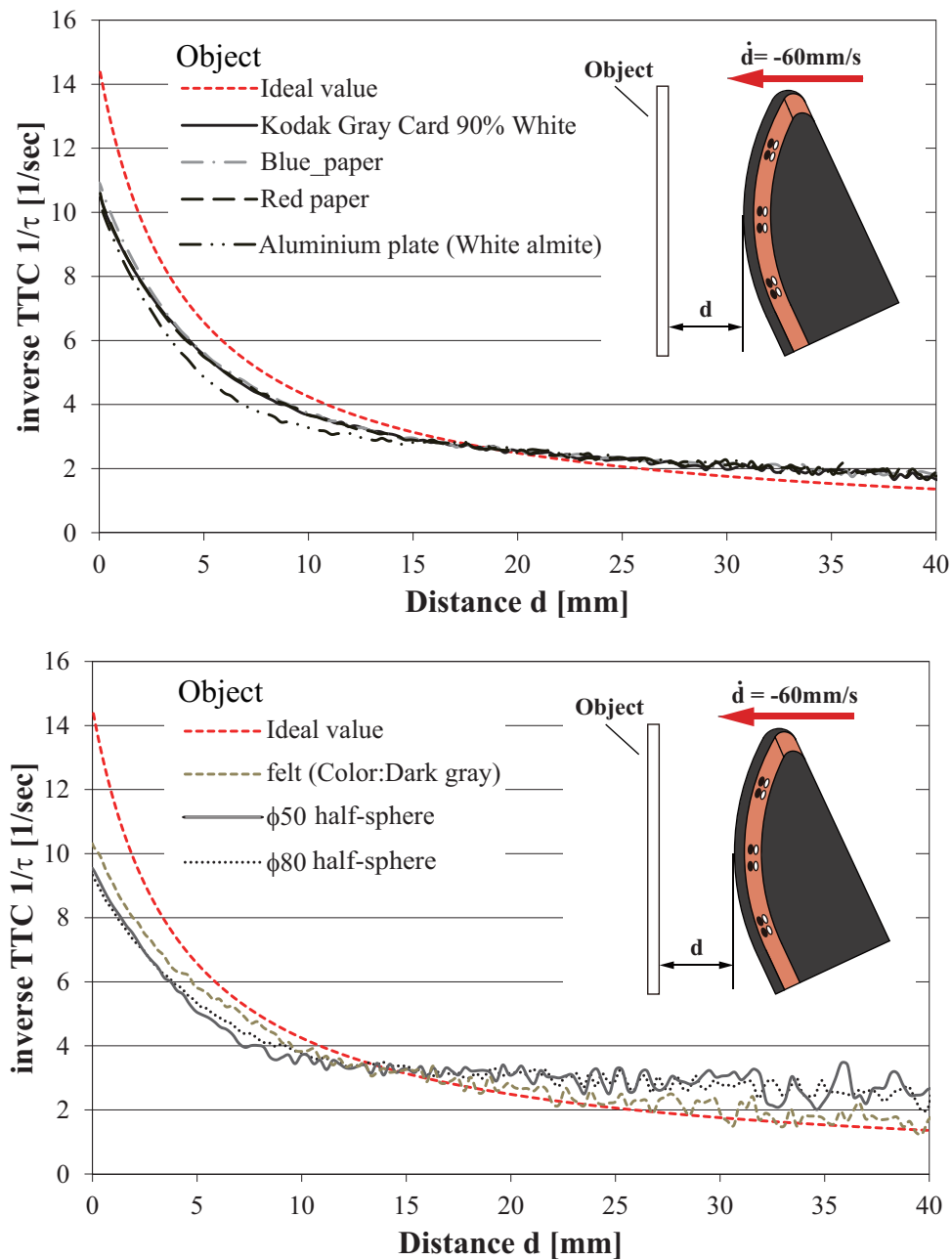


Fig. 7.37 Result of estimating $1/\tau$ at fingertip speed = 60.0 mm/s

7.2.3 TTCを用いた把持実験

制御式(7.22)~(7.24)をハンド3指の各関節に適用し，身の回りにある実際の対象物に対し，把持実験を行った．対象物は図7.38のように色，模様，材質，形状等が様々な物体を用意した．接触時の速度 \dot{d}_{contact} は -33.3mm/s とし，根元の屈曲関節の最大速度 $\dot{\theta}_{1-\text{max}}$ は 2.0rad/s ，式(7.27)に基づきゲイン \hat{K}_1 を決定した．なお，フォトリフレクタと物体との接触面の間のオフセット距離 d_o は，フォトリフレクター基板表面間の距離 2.844mm とすべり覚センサの厚み 2.0mm を足した値， $d_o = 4.844\text{mm}$ とした．表7.4にゲイン \hat{K}_1 の計算に使用したパラメータとゲイン値を示す．

また，7.2.2節の実験と同様に， $1/\tau$ の計算にはFOAWを用いた．りんご，バ

Table 7.4 Parameter and gains of relative speed control using $1/\tau$

Item	Symbol	Value	Unit
Speed at the time of contact	\dot{d}_{contact}	-33.3	mm/s
Maximum joint angular velocity	$\dot{\theta}_{1-\text{max}}$	2.0	rad/s
Offset distance	d_o	4.844	mm
Length of first link	L_1	43.5	mm
Feedback back gain of $1/\tau$	\hat{K}_1	0.18	-
Feedback back gain of x_c	K_2	12.0	-
Feedback back gain of y_c	K_3	10.0	-

ナナ，サンドイッチ，おもちゃでの把持の様子と指先速度の時間変化を図7.39・7.40に示す．同図の上段が初期姿勢，中段が最終的な把持姿勢である．また下段のグラフは，縦軸が第3指の指先速度であり，横軸は制御開始からの経過時間を示している．なお，グラフ内の赤線は，指3の触れすべり覚センサが，物体との接触を検知したタイミングを示している．

同図中段の最終的な把持姿勢の写真より，各物体の形状に倣って把持姿勢を調整できている．また，下段のグラフより，把持までの時間は，りんごで 1.06s ，バナナで 1.25s ，サンドイッチで 1.38s ，おもちゃで 1.09s であり，比

較的短い時間で接触に至っている．指先速度は，最大で -89.6 mm/s の速度に到達した後，物体に近づくにつれ減速しており，接触時の速度は，りんごで -37.0 mm/s ，バナナで -32.6 mm/s ，サンドイッチで -25.6 mm/s ，おもちゃで -33.3 mm/s であり，設定値 -33.3 mm/s に近い速度である．また，その他の対象物の，最大指先速度と接触時の指先速度を表7.5に示す．設定速度 -30.0 mm/s に対し，最大で 11.2 mm/s 程度の誤差があるものの，全ての対象物で，接触時の速度を減速するように制御できている．ただし，透明や黒色の表面を持つ物体では，反射光が極端に小さくなることにより，十分なセンサ出力が得られず，把持を失敗した．

以上の結果から，透明や黒色の物体以外であれば，対象物表面の光の反射率に依存せずに，相対速度制御が可能である．相対速度を調整することで，対象物やハンドに余分な力を加えることなく把持できるメリットがある．実際，サンドイッチは，大きな接触速度で把持すると容易に変形してしまいが，図7.40からも確認できる通り，ほぼ変形させることなく接触状態まで至ることができた．



Fig. 7.38 Grasping target objects (apple, banana, sandwich, plastic toy, paper box, aluminum box, ball, tape, potato, soft toy, glass and black can)

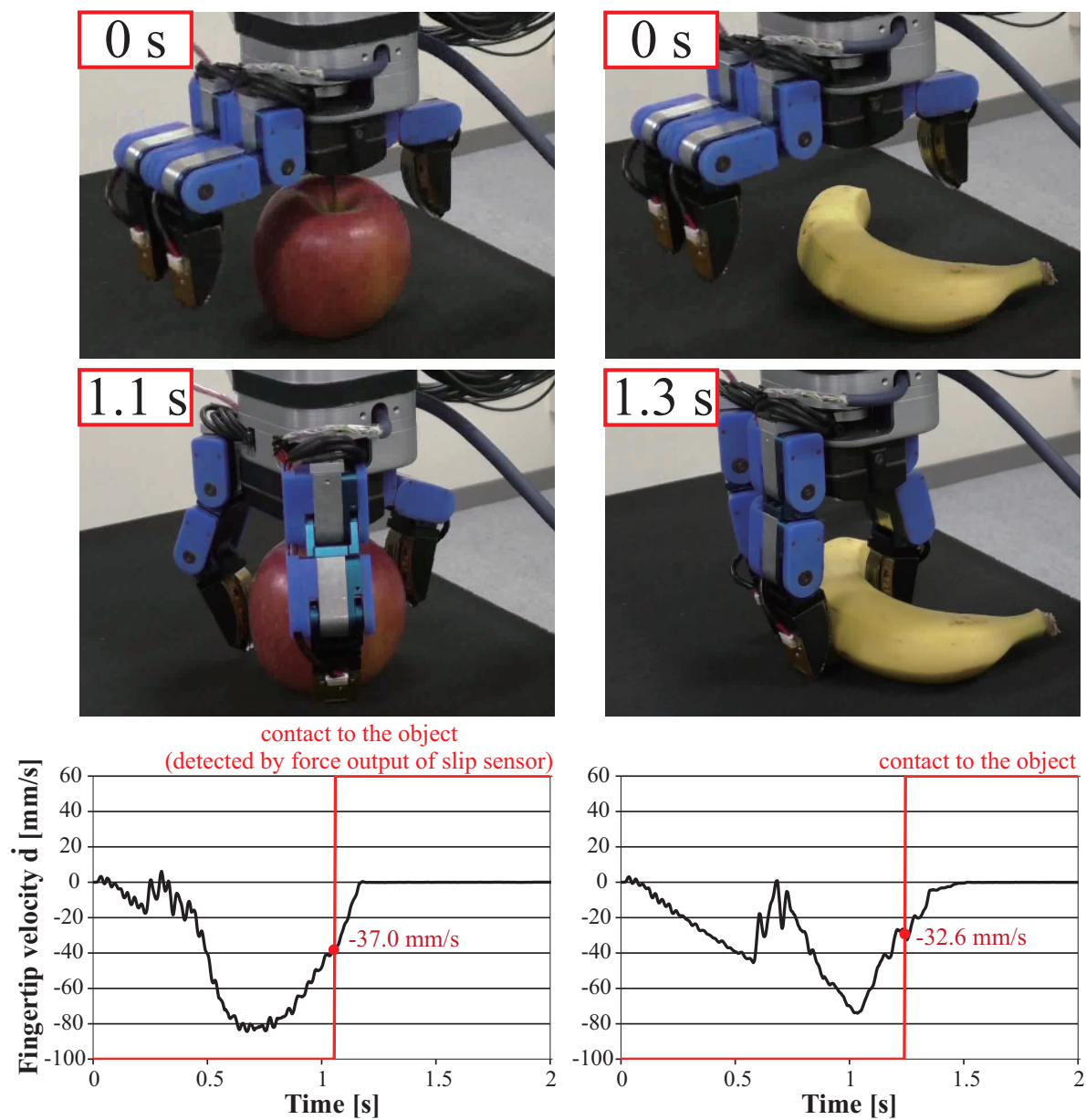


Fig. 7.39 Grasping result of apple and banana (Upper)Initial position of finger and each object, (Middle) contact position to the object, (Lower) fingertip velocity and contact timing (detected by tactile sensor)

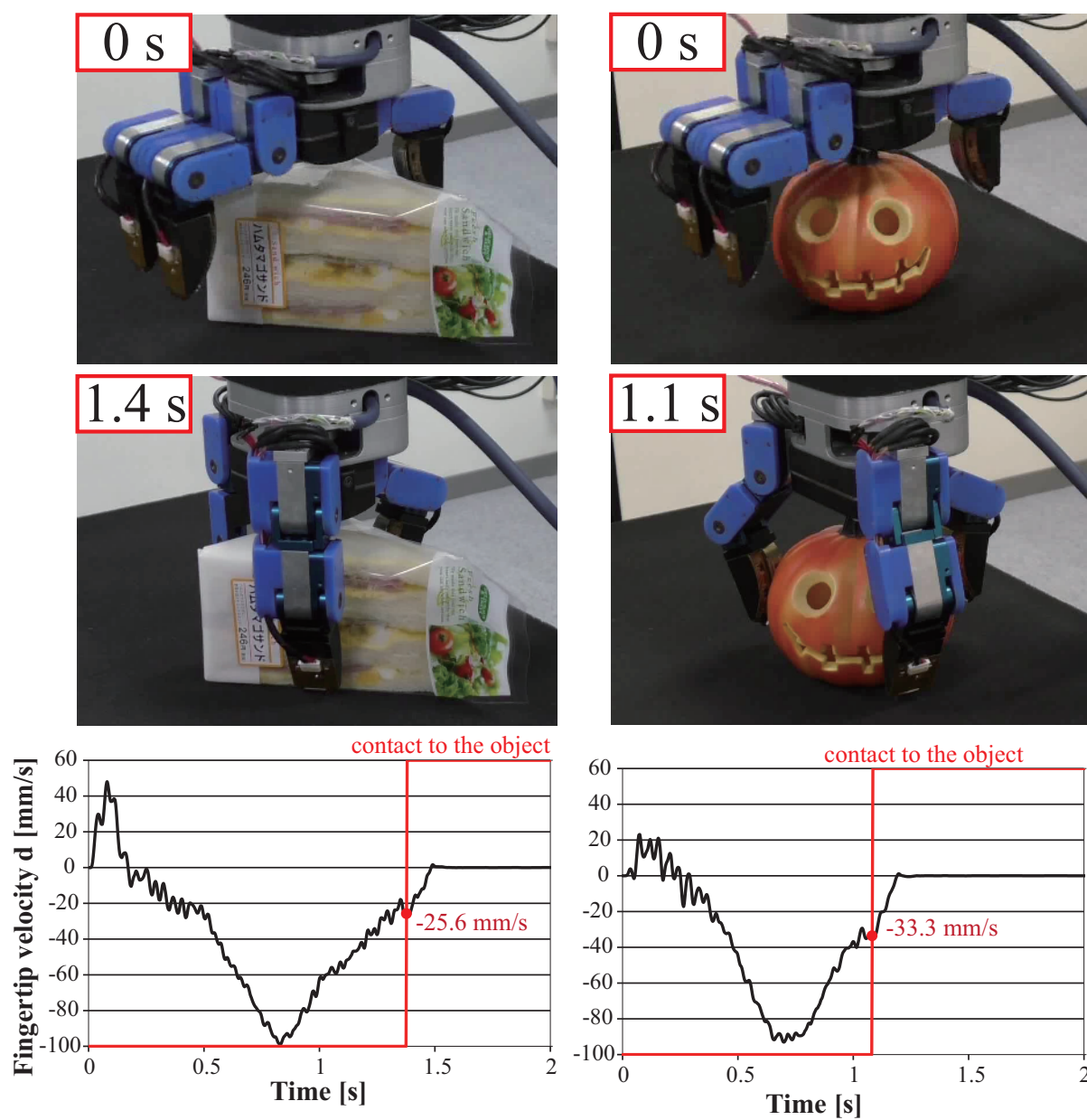


Fig. 7.40 Grasping result of sandwich and plastic toy (Upper)Initial position of finger and each object, (Middle) contact position to the object, (Lower) fingertip velocity and contact timing (detected by tactile sensor)

Table 7.5 Fingertip velocity at the time of contact for each object.

Object	\dot{d}_{contact}	\dot{d}_{max}	success or failure
Paper box	-20.1	-89.6	○
Aluminum box	-18.8	-72.9	○
Ball	-28.7	-74.4	○
Tape	-35.3	-83.4	○
Potato	-18.29	-88.9	○
Soft toy	-35.1	-73.2	○
Glass	-	-60.0	×
Black can	-	-71.1	×

7.3 まとめ

本章では，物体表面の光の反射率に依存しない指先の絶対距離制御と相対速度制御を提案し，この応用例として，全指同時接触での把持と接触時の指先減速制御を示した．

実験データから，距離出力 I_{all} は一定乗数 n とオフセット距離 d_0 ，反射率 αk をパラメータとする式で近似可能であり，この近似式を利用することで反射率の推定や接触時間 TTC を推定可能なことを示した．

また，把持実験では，把持面の光の反射率が 31.9% ~ 76.1% 程度異なる対象物に対し，各指を等距離に配置することで全指同時接触での把持が可能なことを確認した．さらに，りんごやぬいぐるみ，プラスチック製のおもちゃ等の身の回りにある様々な物体に対し，物体の事前情報なしで接触速度の減速が可能なことを示した．

絶対距離制御は，正確に指先位置を調整できる利点がある一方で，反射率推定の計算に相対移動距離を必要とすることから，ハンドと物体の相対位置関係が時々刻々と変化する場合には適用しがたい．このことは，未知速度で移動する物体を把持する際や，ハンドに加えアーム手先位置・姿勢も制御する際に問題となる．

一方，相対速度制御では，センサ出力のみを用いることから，ハンドと物体の相対位置関係が変化する場合にも適用できる可能性があり，ハンドとアームの統合制御を行う際には相対速度制御の方が適していると考えられる．

第8章

ハンドとアームの統合制御

6・7章では，ハンドの各関節のみを制御対象としたが，実環境で把持を行うためには，アーム手先位置・姿勢も制御する必要がある，ハンドとアーム両方の動作があって初めて，各種物体形状や位置・姿勢誤差に応じた適切な把持が可能となる．そこで，本章では，ハンド各関節の反射型制御に加えて，アーム手先位置・姿勢を調整するための反射型制御を導入する（図8.1 赤枠部分）．ハンドとアームの反射型制御は独立，かつ並列に実行されるが，ハンドの関節角度が可動限界に達した際は，アーム側で自然と手先位置・姿勢調整が行われ，適切な把持位置・姿勢への移行が可能となる．

以降では，アーム手先位置・姿勢を調整するための制御方式を述べ，静止物体と動的物体に対する把持位置・姿勢の修正実験の結果について説明する．

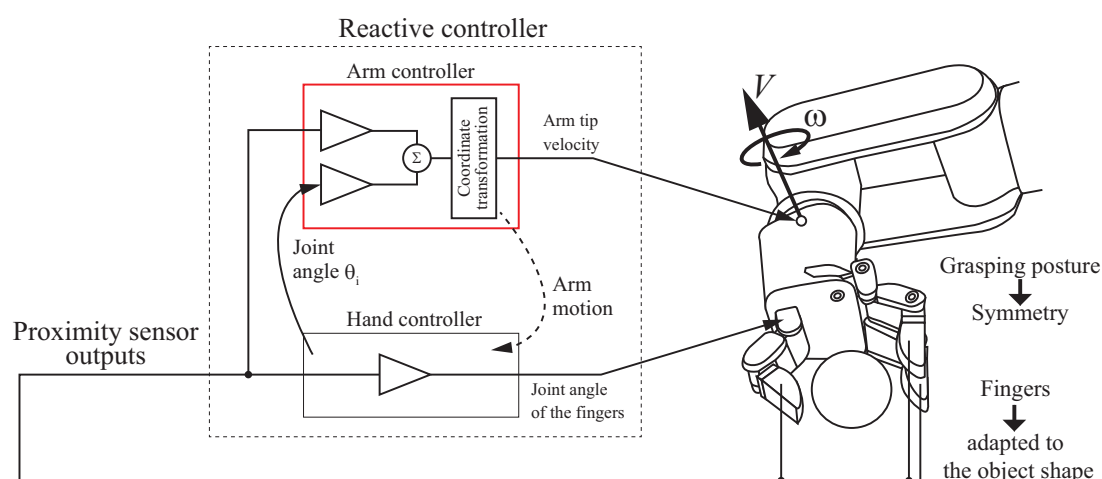


Fig. 8.1 Schematic diagram of the reactive controller of the arm

8.1 アーム手先位置・姿勢の制御方式

指先部のセンサフィードバックに基づき，ハンドとアームを統合的に制御する方式としては，遠藤ら^[84, 85]がハンド・アーム型ハプティックインターフェースに用いた“修正可操作性最適化制御”がある．修正可操作性最適化制御では，ハンド各指の可操作性と各関節角度の最大可動範囲により定義される評価関数が最適値となるように，アーム関節へのトルク指令値を調整する．この方式では，複数指の可操作性と関節の可動範囲を一つの評価関数にまとめているため，様々な指数や関節数の多指多関節ハンドに適用可能というメリットがある．しかしながら，評価関数の計算に使用するパラメータは全て試行錯誤で決定する必要があり，設計者があらかじめ調整しなければならない値が多いという欠点がある．制御系のパラメータをシミュレーションや学習により決定する場合，変数は少ない方が望ましいため，本論文では，試行錯誤的なパラメータ調整を必要としない制御方式を用いる．本論文の制御方式は，対向する2指間と物体の間での位置・姿勢関係が左右対称となるようにアーム手先位置・姿勢を制御する．以降では，このアーム手先位置・姿勢制御について説明する．

図8.2左と図8.3左に，アーム手先位置中心と物体中心との間に位置・姿勢誤差がある状態でプリグリップ制御を行った際の指先位置の収束例を示す．なお，この例では，旋回関節 $(\theta_7, \theta_8) = (90^\circ, 90^\circ)$ であり，指1と指3は対向する姿勢関係にある．図8.2左や図8.3左の位置・姿勢で把持を行うと，指1と指3の指先での接触面積が小さくなり，過剰な面圧の発生や物体の取りこぼし等の把持失敗が生じやすくなる．

このような把持失敗を避けるために，アーム手先位置・姿勢を制御し，図8.2右，および図8.3右の左右対称な把持姿勢に調整する．具体的には，指1と指3が互いに対向していることを利用し，ハンド関節角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_5, \theta_6$ と，近接覚センサの位置出力 y_{c1}, y_{c3} を用いて，式(8.1)~(8.5)のアーム手先速度制御

を行う。

$$V_{X_m} = V_{\max} \frac{y_{c1} - y_{c3}}{y_{c\max}} \quad (8.1)$$

$$V_{Y_m} = V_{\max} \frac{\theta_5 - \theta_1}{\theta_{\max1}} \quad (8.2)$$

$$V_{Z_m} = V_{\max} \frac{-\theta_1 - \theta_2 - \theta_5 - \theta_6 + 2\phi_o}{\theta_{\max2}} \quad (8.3)$$

$$\omega_{X_m} = \omega_{\max} \frac{\theta_5 + \theta_6 - \theta_1 - \theta_2}{\theta_{\max3}} \quad (8.4)$$

$$\omega_{Z_m} = \omega_{\max} \frac{y_{c1} + y_{c3}}{y_{c\max}} \quad (8.5)$$

ここで、 V_{X_m} , V_{Y_m} , V_{Z_m} はそれぞれアーム手先 X_m, Y_m, Z_m 方向の並進速度目標値であり、 ω_{X_m} , ω_{Z_m} はそれぞれ Y_m, Z_m 軸周りの回転速度目標値である。また、

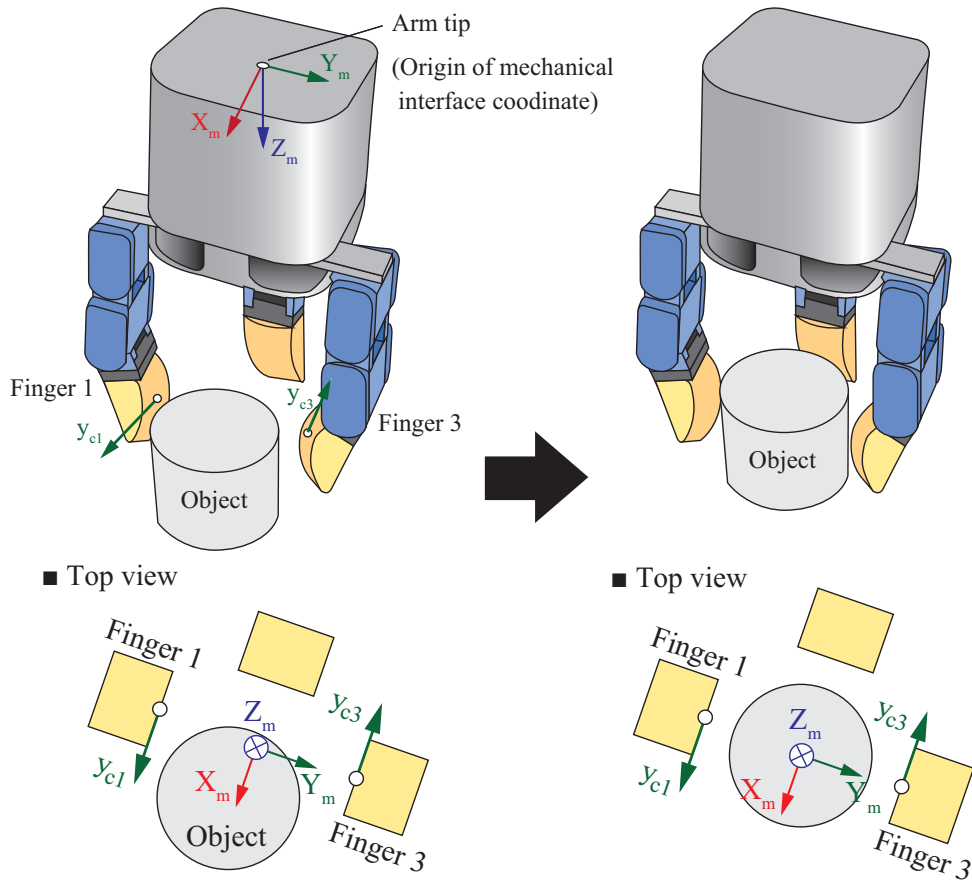


Fig. 8.2 Position and posture adjustment of the arm tip using sensor output y_c

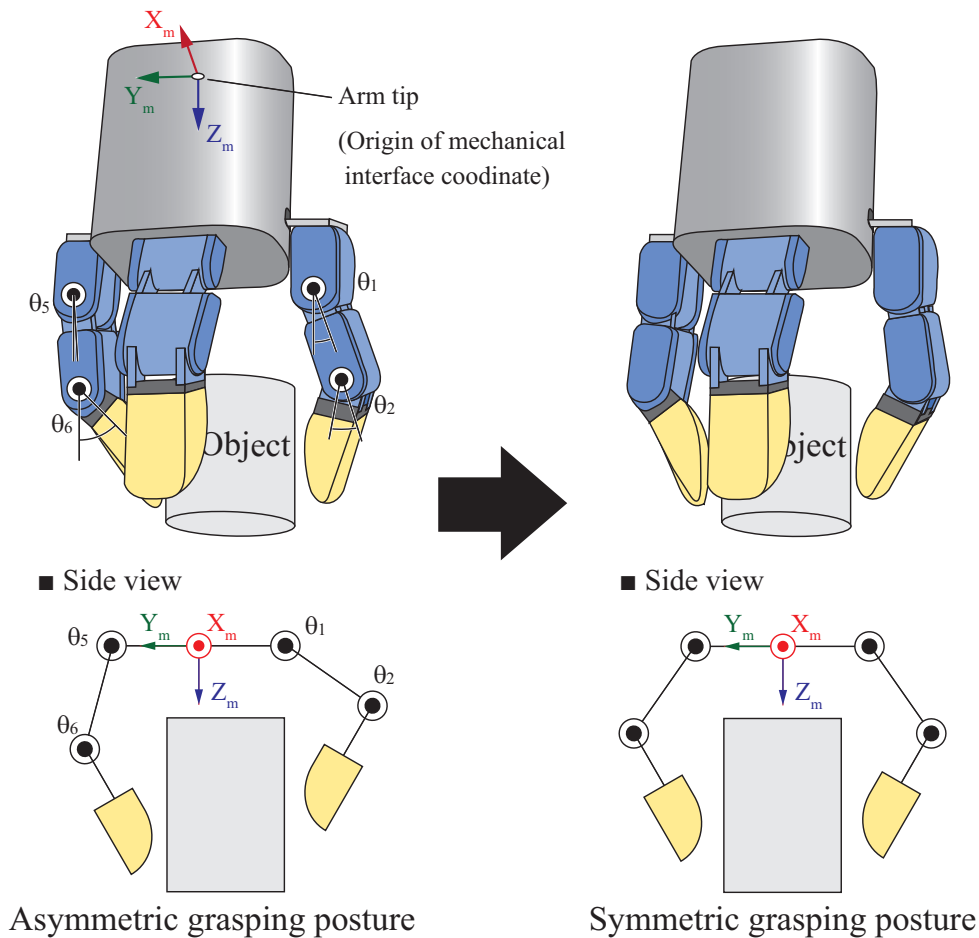


Fig. 8.3 Position and posture adjustment of the arm tip using joint angles of 2 fingers

V_{\max} , ω_{\max} はアーム手先並進・回転方向の最大速度を設定する．なお， ϕ_o は指先のピッチ角のオフセット角度である¹．また， $\theta_{\max1}$, $\theta_{\max2}$, $\theta_{\max3}$ は，それぞれの制御式の分子の最大偏差である．これらの最大偏差の値は，アーム手先中心と物体中心との間で最大位置・姿勢誤差が生じている際のハンド関節角度値から決定する．

また，およその物体中心を基準として，アーム手先姿勢を制御するために，アーム手先座標原点から Y_m , Z_m 方向に $y_{\text{rot.center}}$, $z_{\text{rot.center}}$ だけオフセットした位置を回転中心とする．このオフセット位置 $y_{\text{rot.center}}$, $z_{\text{rot.center}}$ とアーム手先座標の原点，回転中心の位置関係を図8.4に示す．なお，オフセット位置

¹6 章，Fig6.2 内で図示している

$y_{\text{rot.center}}, z_{\text{rot.center}}$ は，式(8.6)・(8.7)で計算する．

$$y_{\text{rot.center}} = \frac{1}{2} (y_1 + y_3) \quad (8.6)$$

$$z_{\text{rot.center}} = \frac{1}{2} (z_1 + z_3) \quad (8.7)$$

ここで，式中の y_i, z_i は，アーム手先座標を基準とする指 i の Y_m, Z_m 方向の位置である． y_i, z_i はハンド関節角度から順運動学により計算する．これらのアーム手先位置・姿勢制御式と各指のプリグラスプ制御を同時に実行することで，対向する2指と物体との間の位置・姿勢関係を左右対称に調整する．

次に，指1と指2，指2と指3が対向している際も同様の制御式が考えられることを利用し，各指間の制御式の重み付け和を計算することで，アーム手先6自由度の速度目標値を計算する．この重み付け計算には，式(8.8)~(8.10)

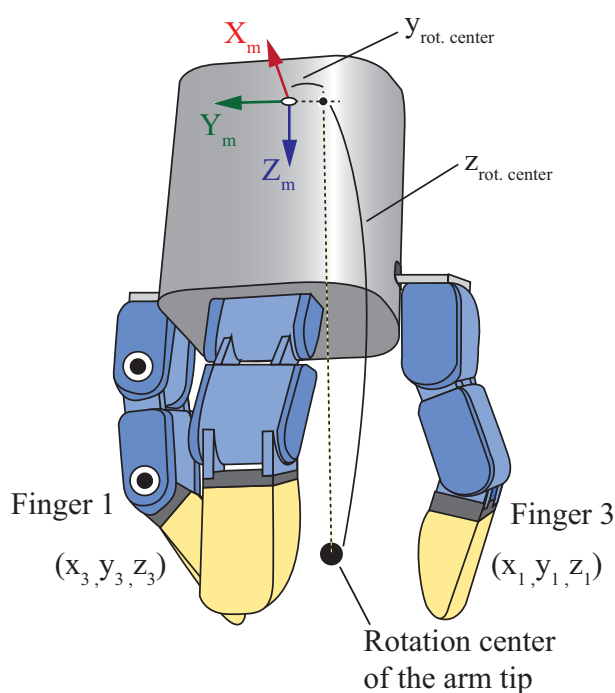


Fig. 8.4 Rotation center of the arm tip and offset position $y_{\text{rot.center}}, z_{\text{rot.center}}$

で定義される2指間の対向度合いを使用する.

$$a_{12} = \max(0, \cos \theta_7) \quad (8.8)$$

$$a_{13} = \max(0, -\cos(\theta_7 + \theta_8)) \quad (8.9)$$

$$a_{23} = \max(0, \cos \theta_8) \quad (8.10)$$

係数 a_{ij} は, 指 i と指 j との間での対向度合いを表す. これらの係数は, 2つの指が対向する姿勢関係で“1”, 直交する姿勢関係で“0”となり, この間で0~1の範囲で連続的に変化する. 2指間の対向度合い a_{12} , a_{13} , a_{23} に対し, 指1と2, 指1と3, 指2と3の間で必要な制御式とを組み合わせることで, アーム手先6自由度の速度制御式は, 式(8.11)~(8.16)とした.

$$V_{X_m} = \frac{V_{\max}}{a_{12} + a_{13} + a_{23}} \left(\frac{\theta_1 - \theta_3}{\theta_{\max 1}} a_{12} + \frac{y_{c3} - y_{c1}}{y_{c\max}} a_{13} + \frac{\theta_5 - \theta_3}{\theta_{\max 1}} a_{23} \right) \quad (8.11)$$

$$V_{Y_m} = \frac{V_{\max}}{a_{12} + a_{13} + a_{23}} \left(\frac{y_{c1} - y_{c2}}{y_{c\max}} a_{12} + \frac{\theta_1 - \theta_5}{\theta_{\max 1}} a_{13} + \frac{y_{c3} - y_{c2}}{y_{c\max}} a_{23} \right) \quad (8.12)$$

$$V_{Z_m} = \frac{V_{\max}}{a_{12} + a_{13} + a_{23}} \left(\frac{-\theta_1 - \theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + 2\phi_o}{\theta_{\max 3}} a_{12} + \frac{-\theta_5 - \theta_6 - \theta_1 - \theta_2 + 2\phi_o}{\theta_{\max 3}} a_{13} + \frac{-\theta_5 - \theta_6 - \theta_3 - \theta_4 + 2\phi_o}{\theta_{\max 3}} a_{23} \right) \quad (8.13)$$

$$\omega_{X_m} = \frac{\omega_{\max}}{a_{12} + a_{13} + a_{23}} \frac{\theta_5 + \theta_6 - \theta_1 - \theta_2}{\theta_{\max 2}} a_{13} \quad (8.14)$$

$$\omega_{Y_m} = \frac{\omega_{\max}}{a_{12} + a_{13} + a_{23}} \left(\frac{\theta_1 + \theta_2 - \theta_3 - \theta_4}{\theta_{\max 2}} a_{12} + \frac{\theta_5 + \theta_6 - \theta_3 - \theta_4}{\theta_{\max 2}} a_{23} \right) \quad (8.15)$$

$$\omega_{Z_m} = \frac{\omega_{\max}}{a_{12} + a_{13} + a_{23}} \left(\frac{y_{c1} + y_{c2}}{y_{c\max}} a_{12} + \frac{y_{c1} + y_{c3}}{y_{c\max}} a_{13} + \frac{y_{c2} + y_{c3}}{y_{c\max}} a_{23} \right) \quad (8.16)$$

ここで, V_{X_m} , V_{Y_m} , V_{Z_m} はアーム手先座標 X_m , Y_m , Z_m 方向の並進速度であり, ω_{X_m} , ω_{Y_m} , ω_{Z_m} は X_m , Y_m , Z_m 軸周りの手先姿勢の回転速度である. また, θ_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$) はハンド関節角度であり, y_{c1} , y_{c2} , y_{c3} は, それぞれ, 指1, 2, 3の近接覚センサの位置出力 y_c である.

また，アーム手先座標原点から回転中心までのオフセット位置 $x_{\text{rot.center}}$, $y_{\text{rot.center}}$, $z_{\text{rot.center}}$ は， a_{12} , a_{13} , a_{23} を用いて，式(8.17)～式(8.19)により計算する．

$$x_{\text{rot.center}} = \frac{1}{2(a_{12} + a_{13} + a_{23})} \left((x_1 + x_2)a_{12} + (x_1 + x_3)a_{13} + (x_2 + x_3)a_{23} \right) \quad (8.17)$$

$$y_{\text{rot.center}} = \frac{1}{2(a_{12} + a_{13} + a_{23})} \left((y_1 + y_2)a_{12} + (y_1 + y_3)a_{13} + (y_2 + y_3)a_{23} \right) \quad (8.18)$$

$$z_{\text{rot.center}} = \frac{1}{2(a_{12} + a_{13} + a_{23})} \left((z_1 + z_2)a_{12} + (z_1 + z_3)a_{13} + (z_2 + z_3)a_{23} \right) \quad (8.19)$$

8.2 把持位置・姿勢の修正実験

ハンドのプリグラスプ制御と式(8.11)～(8.16)のアーム手先速度制御により，
1) 静止物体と2) 動的物体に対する把持位置・姿勢の修正実験を行った．両実験共にハンドのプリグラスプ制御は独立制御方式とし，アーム手先速度制御式のパラメータは表8.1の値を使用した．

Table 8.1 Parameters of the arm tip velocity control (Eq. (8.11)～(8.16))

Item	Symbol	Value	Unit
Max. velocity of arm tip (in the translational directions)	V_{max}	200.0	mm/s
Max. velocity of arm tip (in the rotational directions)	ω_{max}	2.0	rad/s
Max. error of the angle 1	θ_{max1}	90.0	°
Max. error of the angle 2	θ_{max2}	40.0	°
Max. error of the angle 3	θ_{max3}	90.0	°
Max. error of position output y_c	$y_{c\text{max}}$	1.0	-

以降では，静止物体における位置・姿勢誤差修正の結果と，移動する物体に対する追従実験の結果を述べる．

8.2.1 静止物体に対する実験

アーム手先中心と物体中心間の位置誤差を手先 X_m , Y_m 方向に 10 mm ずつ変化させ、修正可能な誤差範囲を調べた。なお、対象物は直径 20 mm の円柱を用い、制御式の目標値 I_{ref} は物体との距離 2.5 mm での I_{all} 値を設定した。なお実験では、物体に触れずに動作が収束した場合、成功と判定し、物体に触れた場合や動作が収束しなかった場合は失敗と判定した。

一例として、 X_m 方向の位置誤差 $\Delta x = -20$ mm, Y_m 方向の位置誤差 $\Delta y = -60$ mm の位置での初期位置と最終位置の写真を図 8.5 に示す。初期位置は、指先部の接触面積が減少する非対称な把持姿勢であるのに対し、最終位置では、大きな接触面積で把持できる左右対称な姿勢に収束している。なお、この位置誤差においては、約 2.0 s で初期位置から最終位置に収束した。

また、各位置誤差における位置・姿勢修正動作の成功・失敗をまとめたものを図 8.6 に示す。ここで、図 8.6 右は実験結果を分かりやすくするために、対象物の輪郭と、指の初期位置を実際の寸法関係で追記したものである。同図は、○が成功を表し、×が物体に接触して失敗したことを示す。 X 方向は最大で -30 mm ~ 20 mm, Y 方向は最大で -80 mm ~ 0 mm の位置誤差を修正可能であった。 $+Y$ 方向の位置誤差での実験は実施していないが、ハンド、お

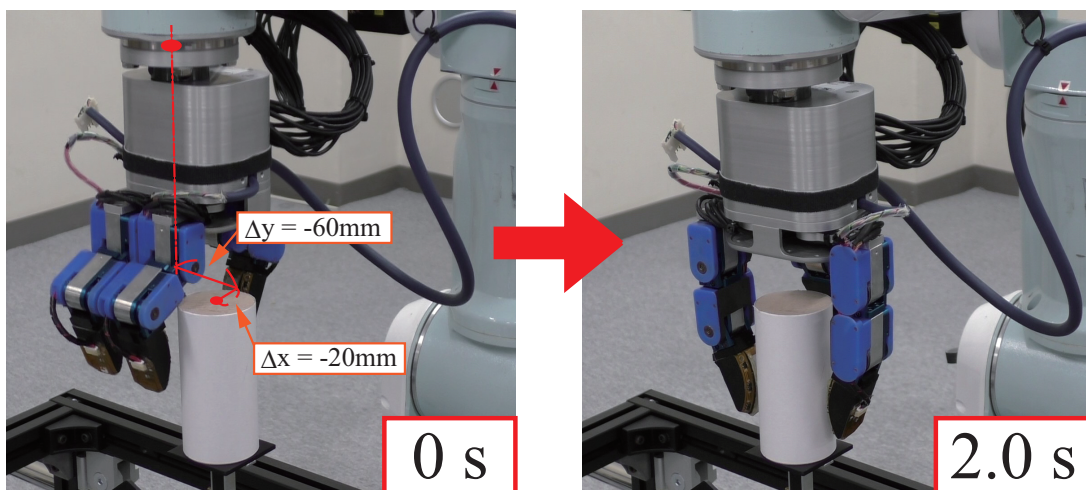


Fig. 8.5 The initial and final position/posture of the fingers and the arm tip

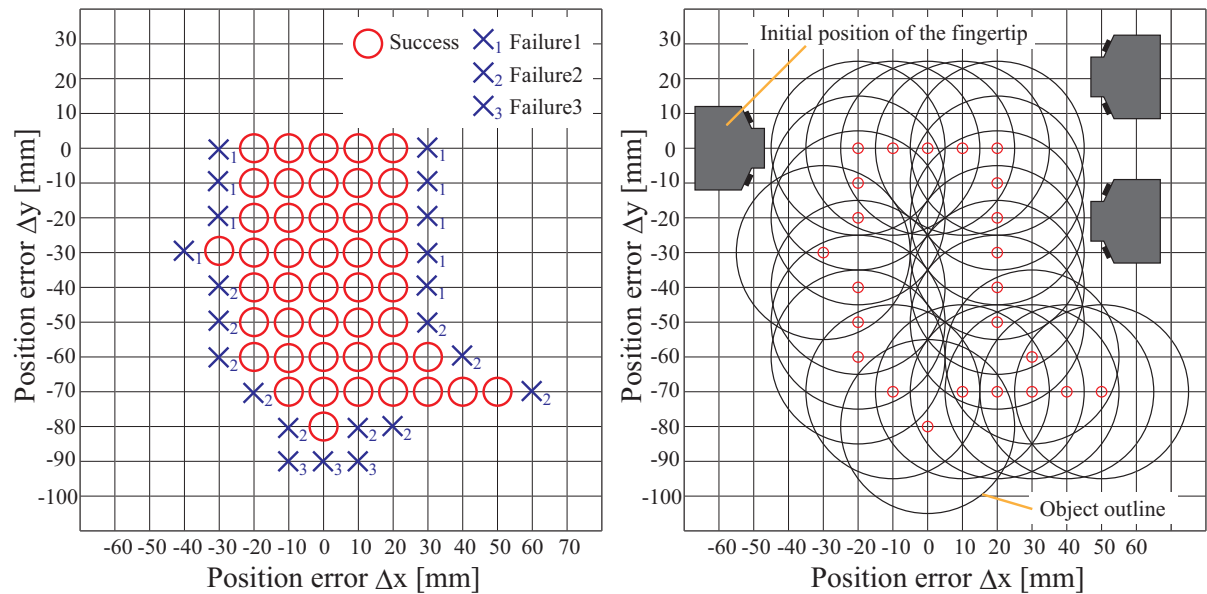


Fig. 8.6 (Left) The table shows a success or failure of the position/posture adjustment, (Right) The table shows the success/failure, the object outline and the initial position of 3 fingers

よびセンサの構造は対称であるためY方向は+80 mm ~ -80 mmの範囲の比較的大きな位置誤差を修正可能であると考えられる。

なお、失敗パターンは3つ確認できたため、それぞれ \times_1 , \times_2 , \times_3 としてある。 \times_1 は、初期位置で物体と指先とが干渉する位置を示している。 \times_2 の位置では、関節 θ_1 と関節 θ_2 を繋ぐリンクが物体に接触したため、失敗と判定した。また、 \times_3 では、近接覚センサが対象物を検出することができず、アーム手先位置・姿勢の修正動作が生成されなかった。

以上の実験結果から、直径20 mmの円柱に対しては、 X_m 方向-30 mm ~ 20 mm, Y_m 方向-80 mm ~ 0 mmの範囲の比較的大きな位置誤差を修正可能である。ただし、 Y_m 方向の位置誤差に関しては、物体からの反射光強度の影響を受けるため、物体面の光の反射率に依存して修正可能な誤差範囲は変化すると考えられる。

8.2.2 動的物体に対する実験

次に、円柱物体をランダムに動作させ、ハンド各指とアーム手先位置・姿勢の追従実験を行った。1.0sごとの連続写真を図8.7に示す。図8.7, ①の時点では、物体が移動したことにより、ハンドの各指は非対称な把持姿勢をとっているが、同図②では、アームの動作によって対称な把持姿勢に修正されている。また、同図⑤, ⑥に示すように、接触面積が減少する方向に、物体が離れていく場合においても、アームの動作により、物体の移動方向に追従し、適切な把持姿勢を保とうとしている。以上の結果から、ハンドとアームで独立した反射型制御により、高速に位置・姿勢誤差を修正可能であることを確認した。

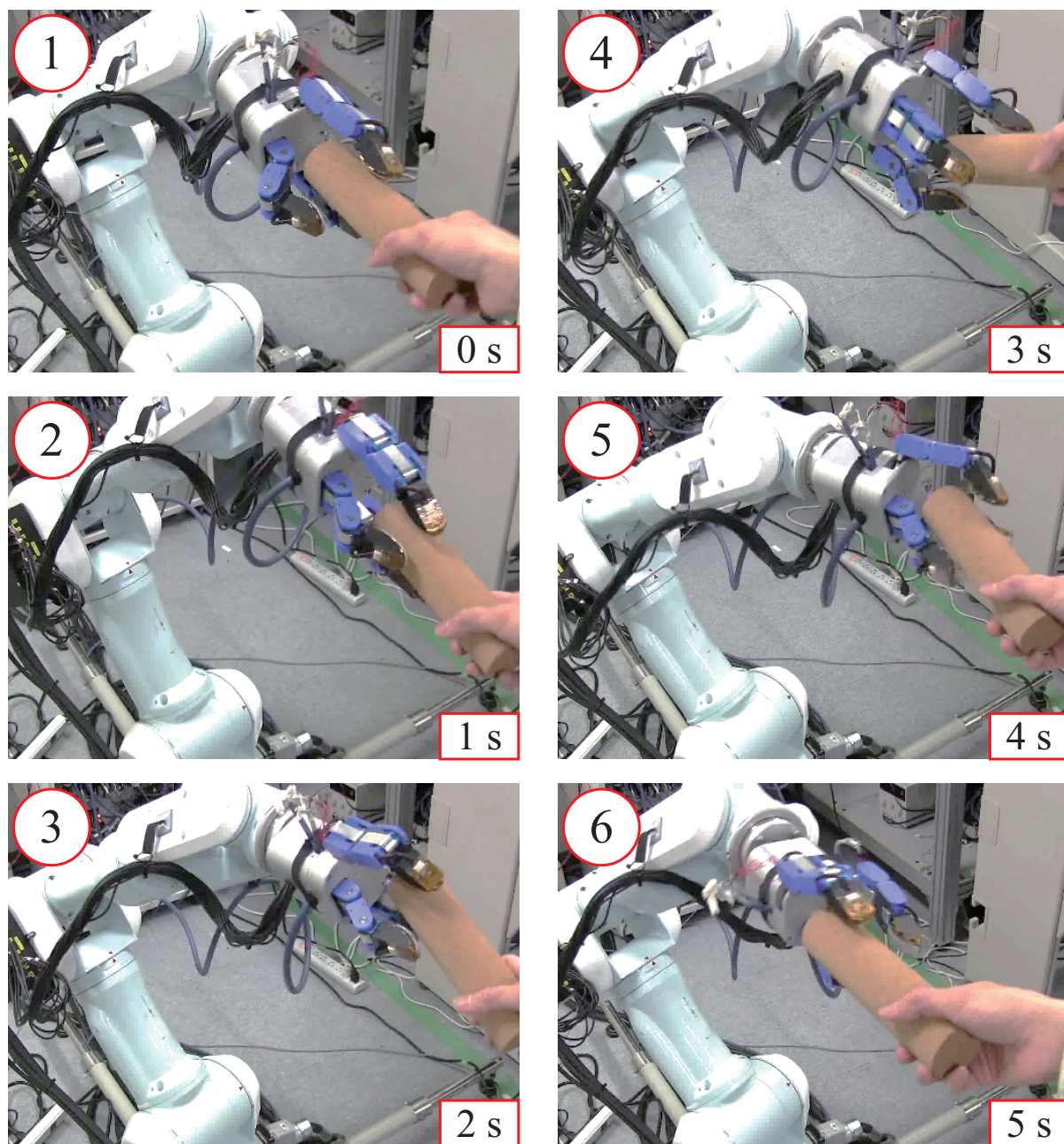


Fig. 8.7 Position and posture adjustment of the arm tip for moving object

8.3 まとめ

本章では，物体形状に倣うハンド各指のプリグラスプ制御に加えて，アーム手先6自由度を同時に調整する制御を導入することで，ハンドとアームの統合制御を実現した．ハンド制御とアーム制御は独立・並列して実行されるが，アーム制御はハンド関節角度に依存し，ハンド制御はアーム手先位置・姿勢の影響を受けることにより，ハンドの関節角度が可動限界に達した際もアーム側が位置・姿勢修正を行うことで，適切な把持位置への調整を可能としている．

実験結果から，静止物体（円柱，直径20mm）に対しては， X_m 方向 $-30\text{mm} \sim 20\text{mm}$ ， Y_m 方向 $-80\text{mm} \sim 0\text{mm}$ の範囲の比較的大きな位置誤差を修正可能であることを確認した．また，ランダムに移動する物体に対してもその移動方向や傾き姿勢に応じて，高速応答で追従動作が可能であった．

第9章

結論と今後の展望

本論文は、近接覚センサを用いた多指多関節ハンドとアームの統合制御方式を提案し、高速応答な把持位置・姿勢の調整動作を実現した。

本章ではこれまでに述べた研究成果をまとめ、さらに、本研究の今後の展望について述べる。

9.1 本研究による成果

第1章では、まず、本研究の背景として、人の作業を代替するロボットに必要な器用なハンドについて説明し、位置・姿勢、形状、重量や摩擦係数に応じた把持が必要であることを述べ、視覚、触覚、近接覚センシングに基づく把持を紹介した。この中で、視覚・触覚センシングのみに基づく把持では、物体近傍での位置誤差を高速に修正することは困難であるが、近接覚を導入することで、把持の確実性と高速性を向上できることを説明した。次に、近接覚を用いた把持の関連研究を紹介し、これまでに多指多関節ハンドとアームを近接覚のみで制御する試みが取り組まれていないことについて言及した。この上で、本論文では多指多関節ハンドとアームの統合制御方式を提案し、高速な把持位置・姿勢調整動作を実現することが目的であることを述べ、また、本論文の概要と構成を説明した。

第2章では、本論文で提案する統合制御方式の新規性と有用性を明確にするために、ロボットアーキテクチャの変遷を述べ、従来研究で提案された方式との比較を行った。まず、従来の分類と同様に、ロボットアーキテクチャをモデル規範型と行動規範型、ハイブリッド型とに分け、本論文ではさらに、行動規範型に属するものをサブサンプションアーキテクチャ、生物模倣型、反射型制御とした。そして、反射制御型に位置づけられる研究をセンサダ

イレクト制御型，状態遷移型とに分け，本研究の制御方式はセンサダイレクト制御型に位置づけられることを述べた．そして，それぞれの反射型制御の利点と欠点を整理することで，本研究で提案する統合制御方式の特徴や長所を明確にした．

第3章では，ハンドとアームの統合制御を実現するに当たり，指先の姿勢と距離の同時制御に適した出力特性を持つセンサ設計・開発を行った．まず，指先形状とセンサ実装面を設定し，このスペースに配置可能な小型検出素子を選定した．次に，この素子の配置設計では，物体面の傾きを高感度に検出でき，かつ，姿勢変化による距離計測値の変動を小さくするためのパラメータを考案した．光学シミュレータ上で，これらのパラメータをスイープさせた際の出力特性の変化から，望みのセンサ出力特性とするための素子配置を決定した．

第4章では，指先部の近接覚センサによる物体面の傾き・距離検出特性を実験により検証した．この結果から，面の傾き検出特性は高感度であり，かつ，姿勢変化による距離出力変動が小さく抑えられていることから，素子配置設計による出力特性の向上を確認した．また，表面の光の反射特性の異なる複数の物体での実験結果から，色や模様，材質，形状の影響を受けずに，ロバストに物体面の傾き検出が可能であることを明らかにした．ただし，距離検出の特性は物体面の光の反射率の影響を受けるため，実際のハンド制御では，反射率を既知とするか，センサ出力を補正する手法が別途必要であると結論づけた．なお，この補正手法については第7章で述べている．

第5章では，ハンドとアームの統合制御を高速かつ安定して実行するための制御システムについて述べた．まず，多指多関節ハンドとロボットアームの主な仕様を紹介し，ハードウェア構成と各機器の接続を明確にした．そして，複数の近接覚センサを搭載した際に問題となるセンサ間での光の干渉を避けるためのセンサLEDの点灯制御について述べた．さらに，アーム手先速度を制御する際に問題となる運動学的な特異点近傍での制御に関しては特異点適合法を導入することで解決した．以上の工夫により，複数のセンサ出力を正しく計測し，ハンドとアームを高速かつ安定して制御する

システムを構成した。

第6章では，センサ出力を目標値として関節角度を直接制御する方式を提案し，実験でその応答特性を検証した．実験結果から，物体表面の反射率が既知の場合，センサ検出範囲内で指先の初期位置・姿勢を様々に変化させたとしても，一定姿勢，かつ目標距離に収束することを明らかにした．また，りんごのように曲面を持つものや，表面に模様が印刷された対象物への姿勢調整の他，移動する物体への高速な追従動作も可能であることを示した．

第7章では，物体表面の光の反射率が未知の物体に対し，1) 指先の絶対距離制御による全指同時接触での把持，と2) 指先の相対速度の制御によるソフトな接触を提案した．まず，1) 絶対距離制御では，反射率推定により，最大0.65 mmの精度で絶対距離の検出が可能であり，反射率が31.9%～76.1%の物体を全指同時接触で把持可能なことを実験結果により示した．また，2) 相対速度制御では，生態学的知見である“Time-to-contact”による衝突時間推定をセンサ出力補正に応用することで，りんご，バナナ，サンドイッチなどの様々な日用品を潰さず，かつ高速に把持可能なことを示した．

第8章では，各種物体の形状・位置・姿勢に自動的に倣って把持を行うためのハンド・アームの統合制御方式を実現した．この方式では，ハンド各指で物体面に対する姿勢と距離の調整を行い，この把持姿勢が左右対称となるようにアーム手先位置・姿勢を修正することで，ハンドとアーム両方を協調して制御する．実験結果から，人が手でランダムに移動させた物体への高速な追従が可能であり，テーブル面に置かれた対象物の位置・姿勢に倣って自動的に把持位置・姿勢を修正可能なことを示した．

9.2 今後の研究展開

提案したハンドとアームの統合制御方式は，物体近傍における把持の確実性と高速性を向上させるものであり，遠隔操作ロボットへの応用や，視覚センサ情報との組み合わせによる知的ハンドシステムの実現が期待できる．

9.2.1 遠隔操作への応用

被災地で活動する探査・救助ロボットは、人がモニターを見て操作することから、奥行き感の欠如や死角による情報欠落、また、通信の遅延により、ロボットを望みどおりに操縦できない問題が生じる。また、バルブの開閉や瓦礫の撤去等の複数のタスクをこなすには、多自由度のハンドとアームが望ましいが、操作者の操縦負担が増大する欠点がある。例えば、ペン型のハプティックデバイスやデータグローブは人間の動きをロボットに直に反映させることができることから、直感的に操作できる利点がある。だが一方で、姿勢維持による疲労の問題があり、長時間の操作に向いていない。これに対し、コントローラーによるボタン操作の場合、姿勢の維持は容易であるが、多自由度のロボットを操作する場合、ボタン数が増加し、操作者の操縦負担が大きくなる。

上記の問題に対し、本研究で実現したハンドは、ロボット自身が自律的に把持を実行するため、情報欠落・遅延による把持位置・姿勢のずれの修正が可能であり、また操作者の操縦負担の軽減が期待できる。遠隔操作ロボットへの近接覚の導入は、当研究室で現在、研究を進めており、ハンドとアームに加えて移動台車を含むシステムを構築中である。

9.2.2 視覚と近接覚の組み合わせ

近接覚センサを用いた把持位置・姿勢の決定は、対象物の局所的な形状に依存するため、あらかじめ、視覚センサにより適切な初期位置・姿勢にハンドをアプローチする必要がある。

視覚と近接覚の組み合わせによる把持戦略に関しては、当研究室の瀬戸川^[86]と鈴木^[87]が過去に取り組んでおり、視覚センサとしてKinectを用い、対象物の円柱近似を利用した把持位置・姿勢の決定や、移動する物体の軌道予測を用いた高速な把持動作を実現している。しかしながら、円柱のような単純な形状に対象物を近似すると、例えばコップの取っ手のように、近似形状からはずれる部分は情報が欠落するため、特定の把持位置・姿勢を選択す

ることが困難になる．このため，より高度な物体認識技術と近接覚による反射型制御を組み合わせる必要があると考えている．

近年，視覚による一般物体認識の技術は飛躍的に成果を上げており，Amazon Picking Challenge 2016ではディープラーニングを用いて商品を識別するチームが現れるなど，ロボットへの応用も始まっている．この高度な対象物識別と従来の物体位置・姿勢認識，および近接覚による反射型制御を組み合わせることで，対象物に応じた適切な把持位置の決定，および動作の高速性・確実性を両立できると考えられる．

謝 辞

本研究を遂行するにあたり，多くの方に支えていただきました．

卒業研究配属以後，公私にわたり多大なご指導をいただいた電気通信大学 情報理工学研究科 知能機械工学専攻 下条誠 特命教授に深く感謝致します．

同じく卒業研究配属以後，様々なご助言を頂いた電気通信大学 情報理工学研究科 知能機械工学専攻 明愛国 教授に深く感謝致します．

横井 浩史教授，金子 正秀教授，田中 一男教授，長井 隆行教授には審査を通して多くの貴重なご意見をいただきました．心より謝意を表します．

また，研究遂行にあたり，様々なご助言，ご指摘をして頂いた同専攻 知能機械工学科 下条・明研究室の諸氏に深く感謝致します．

本研究の一部は日本学術振興会，科学研究費補助金（特別研究員奨励費）により行われました．記して謝意を表します．

参考文献

- [1] Amazon picking challenge, ICRA 2015, Seattle WA (online),
available from \langle <http://amazonpickingchallenge.org/> \rangle , (accessed on 30 June, 2015).
- [2] Barrett Hand, Barrett Technology(online),
available from \langle <http://www.barrett.com/products-hand.html> \rangle , (accessed on 30 October, 2016).
- [3] 3-FINGER ADAPTIVE ROBOT GRIPPER, ROBOTIQ(online),
available from \langle <http://robotiq.com/products/industrial-robot-hand/> \rangle , (accessed on 30 October, 2016).
- [4] A. M. Dollar and R. D. Howe, “The Highly Adaptive SDM Hand: Design and Performance Evaluation”, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 29, No. 5, pp. 585-597, 2010.
- [5] E. Brown, N. Rodenberg, J. Amend, A. Mozeika, E. Steltz, M. R. Zakin, H. Lipson and H. M. Jaeger, “Universal robotic gripper based on the jamming of granular material”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (PNAS), Vol. 107, No. 44, DOI. 10.1073, 2010.
- [6] R. Deimel and O. Brock, “A compliant hand based on a novel pneumatic actuator”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2047–2053, 2013.
- [7] N. Fukaya, T. Asfour, R. Dillmann and S. Toyama, “Development of a five-finger dexterous hand without feedback control: The TUAT/Karlsruhe humanoid hand”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 4533–4540, 2013.

- [8] 西田 健, 重久 大地, 川島 直晃, “フォースフィードバック機構を有するユニバーサルジャミンググリッパの開発”, 第32回日本ロボット学会学術講演会, 3N3-04, 2014.
- [9] L. P. Jentoft, Q. Wan and R. D. Howe, “Limits to compliance and the role of tactile sensing in grasping”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 6394–6399, 2014.
- [10] J. Amend, N. Cheng, S. Fakhouri and B. Culley, “Soft Robotics Commercialization: Jamming Grippers from Research to Product”, SOFT ROBOTICS, Vol. 3, No. 4, pp. 213-222, 2016.
- [11] 並木 明夫, 石井 抱, 石川 正俊, “高速センサフィードバックに基づく把握行動”, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 7, pp. 707–716, 2002.
- [12] N. Furukawa, A. Namiki, S. Taku and M. Ishikawa, “Dynamic regrasping using a high-speed multifingered hand and a high-speed vision system”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 181–187, 2006.
- [13] 山川 雄司, 並木 明夫, 石川 正俊, 下条 誠, “高速多指ロボットハンドと高速視触覚フィードバックを用いた柔軟紐の結び動作”, 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 9, pp. 1016–1024, 2009.
- [14] 長谷川 勉, 本田 久平, 桐木 利弘, 松岡 毅, “多関節多指ハンドのための操作対象の位置と姿勢のセンシング—視覚情報と接触情報の融合—”, 電気学会論文誌C (電子・情報・システム部門誌), Vol. 118, No. 9, pp. 1340–1346, 1998.
- [15] 村上 剛司, 長谷川 勉, “柔軟指先による把握物体のエッジ方向の触覚計測”, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 2, pp. 240–247, 2006.
- [16] 伊藤 司, 植田 亮平, 垣内 洋平, 岡田 慧, 稲葉 雅幸, “等身大ヒューマノイドの片付け行動におけるカラー距離センサによる物体の把持円柱認識と対象形状を考慮した把持動作生成”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2A2-C01, 2010.

- [17] 伊藤 司, 植田 亮平, 垣内 洋平, 岡田 慧, 稲葉 雅幸, “ヒューマノイドにおける視覚と指先触覚を利用した未知対象物体把持のための行動選択”, 第28回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 103–5, 2010.
- [18] 近野 敦, 多田 允徳, 長嶋 功一, 稲葉 雅幸, 井上 博允, “人間型多指ハンドの開発および手探りによる未知物体の把握実験”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 65, No. 638, pp. 4070–4075, 1999.
- [19] R. A. Lewis and A. K. Bejczy, “Planning considerations for a roving robot with arm”, IJCAI Proceedings of the 3rd international joint conference on Artificial intelligence, pp. 308–316, 1973.
- [20] A.R. Johnston, “Proximity sensor technology for manipulator end effectors”, Mechanism and Machine Theory, Vol. 12, No. 1, pp. 95–109, 1977.
- [21] A. K. Bejczy, “Effect of hand-based sensors on manipulator control performance”, Mechanism and Machine Theory, Vol. 12, No. 5, pp. 547–567, 1977.
- [22] A. K. Bejczy, “Sensors, Controls, and Man-Machine Interface for Advanced Teleoperation”, Science, Vol. 208, No. 4450, pp. 1327–1335, 1980.
- [23] P. Mittendorf and G. Cheng, “Humanoid Multimodal Tactile-Sensing Modules”, IEEE Transactions on Robotics, Vol. 27, No. 3, pp. 401–410, 2011.
- [24] E. Cheung, V. Lumelsky, “A sensitive skin system for motion control of robot arm manipulators”, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 10, No. 1, pp. 9–32, 1992.
- [25] M. Teichmann and B. Mishra, “Reactive algorithms for grasping using a modified parallel jaw gripper”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Vol. 3, pp. 1931–1936, 1994.
- [26] M. Teichmann and B. Mishra, “Reactive Robotics I: Reactive Grasping with a Modified Gripper and Multifingered Hands”, The International Journal of Robotics Research, Vol. 19, No. 7, pp. 697–708, 2000.

- [27] C. M. Seguna and M. A. Saliba, “The mechanical and control system design of a dexterous robotic gripper”, IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS), Vol. 3, pp. 1195–1201, 2001.
- [28] S. Walker, K. Loewke, M. Fischer, C. Liu and J. K. Salisbury, “An Optical Fiber Proximity Sensor for Haptic Exploration”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 473–478, 2007.
- [29] J. Fujimoto and I. Mizuuchi, “Picking up Dishes based on Active Groping with Multisensory Robot Hand”, IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp. 220–225, 2009.
- [30] K. Hsiao, Paul Nangeroni, M. Huber, A. Saxena and A. Y. Ng, “Reactive Grasping Using Optical Proximity Sensors”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 2098–2105, 2009.
- [31] B. Mayton, L. LeGrand and J. R. Smith, “An Electric Field Pretouch System for Grasping and Co-Manipulation”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 831–838, 2010.
- [32] H. K. Lee, S. I. Chang and E. Yoon, “Dual-Mode Capacitive Proximity Sensor for Robot Application: Implementation of Tactile and Proximity Sensing Capability on a Single Polymer Platform Using Shared Electrodes”, IEEE Sensors Journal, Vol. 9, No. 12, pp. 1748–1755, 2009.
- [33] L. Jiang and J. R. Smith, “Seashell effect pretouch sensing for robotic grasping”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 2851–2858, 2012.
- [34] S. Escaida Navarro, M. Schonert, B. Hein and H. Worn, “6D proximity servoing for preshaping and haptic exploration using capacitive tactile proximity sensors”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 7–14, 2014.

- [35] S. E. Navarro, F. Heger, F. Putze, T. Beyl, T. Schultz and B. Hein, “Telemanipulation with force-based display of proximity fields”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 4568–4574, 2015.
- [36] D. Guo, P. Lancaster, L. T. Jiang, Fuchun Sun and J. R. Smith, “Transmissive optical pretouch sensing for robotic grasping”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 5891–5897, 2015.
- [37] J. Konstantinova, A. Stilli and K. Althoefer, “Force and proximity fingertip sensor to enhance grasping perception”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 2118–2123, 2015.
- [38] J. Konstantinova¹, A. Stilli¹, A. Faragasso¹ and K. Althoefer, “Fingertip Proximity Sensor with Realtime Visual-based Calibration”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 170–175, 2016.
- [39] K. Shimonomura, H. Nakashima and K. Nozu, “Robotic grasp control with high-resolution combined tactile and proximity sensing”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 138–143 2016.
- [40] R. Volpe and R. Ivlev, “A survey and experimental evaluation of proximity sensors for space robotics”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Vol. 4, pp. 3466–3473, 1994.
- [41] 天本 晴之, 下条 誠, “2次元状に配置した近接覚センサによる対象物の中心位置検出方式”, 第24回日本ロボット学会学術講演会講演概要集, 1C24, 2006.
- [42] 溝口 善智, 多田 隈 建二郎, 明 愛国, 石川 正俊, 下条 誠, “インテリジェントロボットハンドの研究開発 触・近接覚センサによる捕獲から把持までの制御”, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 3B3–7, 2008.
- [43] 寺田 一貴, 長谷川 浩章, 国府田 直人, 鈴木 陽介, 明 愛国, 石川 正俊, 下条 誠, “ネット状近接覚センサの研究開発—センサ回路の簡略化—”, 第11

- 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演概要集, 3C2-1, 2010.
- [44] 鈴木健治, 鈴木陽介, 長谷川浩章, 明愛国, 石川正俊, 下条誠, “ロボットハンド指先に付与したネット状近接覚センサ情報に基づく把持姿勢の決定”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 48, No. 4, pp. 232-240, 2012.
- [45] 向山由宇, “赤外線反射型近接センサアレーの適切な光学素子配置に関する研究”, 電気通信大学情報理工学研究科修士論文, 2011.
- [46] 長谷川浩章, “ネット状近接覚センサを搭載したロボットハンドによる適応的把持動作の研究”, 電気通信大学情報理工学研究科修士論文, 2009.
- [47] 長谷川浩章, 溝口義智, 多田隈健二郎, 明愛国, 石川正俊, 下条誠, “指先にネット状近接覚センサを装着したロボットハンド-近接覚情報を利用した移動物体追従動作-”, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, 2A2-C22, 2010.
- [48] 長谷川浩章, “抵抗ネットワーク型近接覚センサアレーの研究開発”, 電気通信大学情報理工学研究科博士論文, 2013.
- [49] S. Ye, K. Suzuki, Y. Suzuki, M. Ishikawa and M. Shimojo, “Robust Robotic Grasping Using IR Net-Structure Proximity Sensor to Handle Objects with Unknown Position and Attitude”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 3271-3278, 2013.
- [50] S. Teshigawara, S. Shimizu, T. Tsutumi and Y. Suzuki, Aiguo Ming, M. Shimojo, M. Ishikawa, “High Sensitivity Slip Sensor Using Pressure Conductive Rubber for Dexterous Grasp and Manipulation”, IEEE Sensors, pp. 570-574, 2010.
- [51] 森明日見, “ネット状近接覚センサにおける応答速度の評価と設計手法の研究”, 電気通信大学情報理工学研究科修士論文, 2010.
- [52] J. W. Hill and A. J. Sword, “Manipulation based on sensor-directed control: An integrated end effector and touch sensing system”, 17th Annual Human Factors Society

- Convention, pp. 16–18, 1973.
- [53] 中村 仁彦, 山崎 友敬, “反射行動の重ね合わせ理論とその多指ハンドの反射的把握動作への応用”, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 3, pp. 448–459, 1997.
- [54] K. Hsiao, S. Chitta, M. Ciocarlie and E. G. Jones, “Contact-reactive grasping of objects with partial shape information”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 1228–1235, 2010.
- [55] D. Schiebener, J. Schill and T. Asfour, “Discovery, segmentation and reactive grasping of unknown objects”, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp. 71–77, 2012.
- [56] J. Leitner, M. Frank, A. Forster and J. Schmidhuber, “Reactive reaching and grasping on a humanoid: Towards closing the action-perception loop on the iCub”, International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), pp. 102–109, 2014.
- [57] G. A. Bekey 著, 松田 晃一・細部 博史 訳, “[自律ロボット概論] Autonomous Robots/George A. Bekey”, 毎日コミュニケーションズ, 第5章「自律ロボット用ソフトウェアアーキテクチャ」, pp.89–114, 2007.
- [58] R. A. Brooks 著, 五味 隆志 訳, “ブルックスの知能ロボット論”, オーム社, pp. 26–54, 2006.
- [59] J. Bohg, A. Morales, T. Asfour, D. Kragic, “Data-Driven Grasp Synthesis A Survey”, IEEE Transactions on Robotics, Vol. 30, No. 2, pp. 289–309, 2014.
- [60] R. A. Brooks, “A robust layered control system for a mobile robot”, IEEE Journal on Robotics and Automation, vol. 2, No. 1, pp. 14–23, 1986.
- [61] 及川 一美, 土谷 武士, 大久保 重範, “サブサンプリング・アーキテクチャのオブジェクト指向設計”, 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 6, pp. 697–705, 2005.

- [62] T. G. Brown, "On the nature of the fundamental activity of the nervous centres; together with an analysis of the conditioning of rhythmic activity in progression, and a theory of the evolution of function in the nervous system", *The Journal of Physiology*, Vol. 48, No. 1, pp. 18–46, 1914.
- [63] K. Matsuoka, "Mechanisms of frequency and pattern control in the neural rhythm generators", *Biological Cybernetics*, Vol. 56, No. 5, pp. 345–353, 1987.
- [64] 阪口 豊, "随意運動における運動指令パタンの創発", 計測と制御, 解説: 特集 高次機能の学習と創発 一脳・ロボット・人間研究における新たな展開 一, Vol. 48, No. 1, 2009.
- [65] 栗田 雄一, 永田 和之, 上田 淳, 松本 吉央, 小笠原 司, "神経振動子を利用したロボットハンドによるマニピュレーション:人間計測に基づく操作パターンの生成", 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 70, No. 699, pp. 234–240 2004.
- [66] 栗田 雄一, 永田 和之, 上田 淳, 松本 吉央, 小笠原 司, "神経振動子を利用したロボットハンドによるマニピュレーション, 関節角フィードバックによる把持指切替え周期の適応的変更", 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 71, No. 705, pp. 242–248, 2005.
- [67] 三菱重工 汎用ロボット PA10 シリーズ PA10-7C 総合取扱説明書, 管理 No. 91–10025, Rev. 1, 三菱重工業株式会社.
- [68] 三菱重工 汎用ロボット PA10 シリーズ サーボドライバ取扱説明書 管理 No. マ DC–GC20007, Rev. 0, 三菱重工業株式会社.
- [69] 三菱重工 汎用ロボット PA10 シリーズ プログラミングマニュアル, 管理 No. マ DC–GC20008, Rev. 2, 三菱重工業株式会社.
- [70] 叶 沙, "視覚・近接覚・すべり覚センサを統合したロボットハンドによる対象物把持の研究", 電気通信大学情報理工学研究科修士論文, 2013.
- [71] H. Seraji, "Configuration control of redundant manipulators: theory and implementation", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 4, pp. 472–490,

- 1989.
- [72] Y. Tsumaki, D. N. Nenchev and M. Uchiyama, “Experimental teleoperation of a nonredundant slave arm at and around singularities”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Vol. 1, pp. 385–392, 1996.
- [73] Y. Tsumaki, S. Kotera, D. N. Nenchev and M. Uchiyama, “Singularity-consistent inverse kinematics of a 6-DOF manipulator with a non-spherical wrist”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Vol. 4, pp. 2980–2985, 1997.
- [74] 妻木 勇一, P. Fiorini, G. Chalfant, H. Seraji, “遠隔冗長マニピュレータにおける特異点可視化システムとSC法”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, No. 00-2, 2P1-08-002, 2000.
- [75] 妻木 勇一, 佐藤 雅樹, D. N. Nenchev, “拡張ヤコビ行列を用いたSC法による冗長マニピュレータの制御”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, No. 03-4, 2P2-2F-G3, 2003.
- [76] 高橋 陽介, “ネット状近接覚センサの距離補正方式の研究”, 電気通信大学情報理工学研究科博士論文, 2010.
- [77] 長谷川 浩章, 向山 由宇, 鈴木 陽介, 明 愛国, 石川 正俊, 下条 誠, “検出対象物の寸法・反射特性に対しロバストな二層化近接覚センサの提案”, 第11回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SICE SI), 3C2-3, 2010.
- [78] 石川 正俊, “アクティブセンシングとロボットハンド”, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 7, pp. 938–942, 1993.
- [79] P. P. L. Regtien, “Accurate optical proximity detector”, IEEE Conference on Instrumentation and Measurement Technology, pp. 141–143, 1990.
- [80] F. Janabi-Sharifi, V. Hayward and C. S. J. Chen, “Discrete-time adaptive windowing for velocity estimation”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 8, No. 6, pp. 1003–1009, 2000.

- [81] S. Jin, R. Kikuuwe and M. Yamamoto, “Discrete-time velocity estimator based on sliding mode and adaptive windowing”, IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 835–841, 2012.
- [82] D. N. Lee, “The optic flow field: The foundation of vision”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, Vol. 290, No.1038, pp. 169–179, 1980.
- [83] D. N. Lee and P. E. Reddish, “Plummeting gannets-a paradigm of ecological optics”, *Nature*, Vol. 293 pp. 293–294, 1981.
- [84] H. Aoyama, H. Kawasaki, T. Endo and S. Nakagawa, “Design and Simulation of a Side-Faced-Type Multi-Fingered Haptic Interface”, 37th Ann. Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2011), pp. 3162–3167, 2011.
- [85] 遠藤 孝浩, 川崎 晴久, 中川 志信, 山下 誠治, 土屋 陽太郎, 石樽 康彦, “側面設置型多指ハプティックインターフェイス”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 51, No. 4, pp. 251–259, 2015.
- [86] 瀬戸川 将夫, “簡易視覚と近接覚を用いたロボットハンドによる対象物把持に関する研究”, 電気通信大学情報理工学研究科修士論文, 2014.
- [87] Y. Suzuki, K. Koyama, A. Ming and M. Shimojo, “Grasping Strategy for Moving Object Using Net-Structure Proximity Sensor and Vision Sensor”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 1403–1409, 2015.

付 録 A

抵抗回路網式近接覚センサ：センサ出力計算式の導出

A.1 ネット状近接覚センサの構造

ネット状近接覚センサの構造を図 A.1 に示す. 基準電圧源 $+V_0, -V_0$ は, それぞれ外部抵抗 R_0 を介して抵抗ネットワーク層に接続されており, この2層の抵抗ネットワークは, 各格子点において近接覚エレメントのコレクタ, エミッタに接続されている. また, 電極 S_1, S_3 は外付け抵抗 R_0 を通して電源電圧 $+V_0$ に, 電極 S_2, S_4 は $-V_0$ に繋がっており, センサの出力は4つの電極 S_1, S_2, S_3, S_4 の電圧となる.

A.2 測定原理

A.2.1 電流分布の中心位置とその総和

センサ座標系

初めに, 近接覚エレメント番号とセンサ座標系との対応関係を示す. 図 A.2 にセンサ座標系を示す. 横縦 $m \times n$ の直交格子状に配置されたエレメントで構成されるセンサに対して, センサ中心を原点とし, 四隅のエレメントの座標がそれぞれ $(1, 1), (-1, 1), (-1, -1), (1, -1)$ となるように正規化した直交座標系 $o-xy$ を設定する. また, 座標 $(-1, -1)$ のエレメントを起点として, x 軸正方向に $i = 1, 2, \dots, m$, y 軸正方向に $j = 1, 2, \dots, n$ と番号を与える. このとき, 検出エレメント (i, j) が配置される格子点の座標 $x_e(i), y_e(j)$ は以下のような

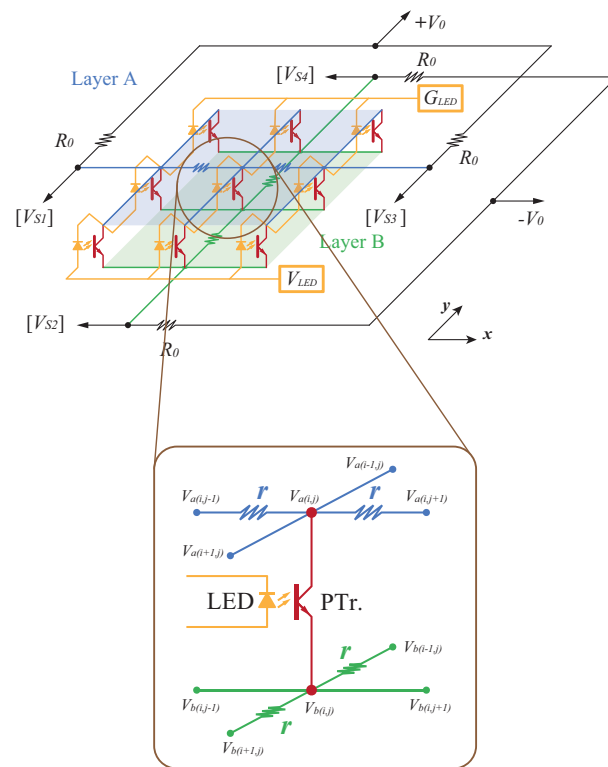


Fig. A.1 Schematic diagram of basic Resistor Network Structure Proximity(RNSP) sensor (Type with reduced number of resistors)

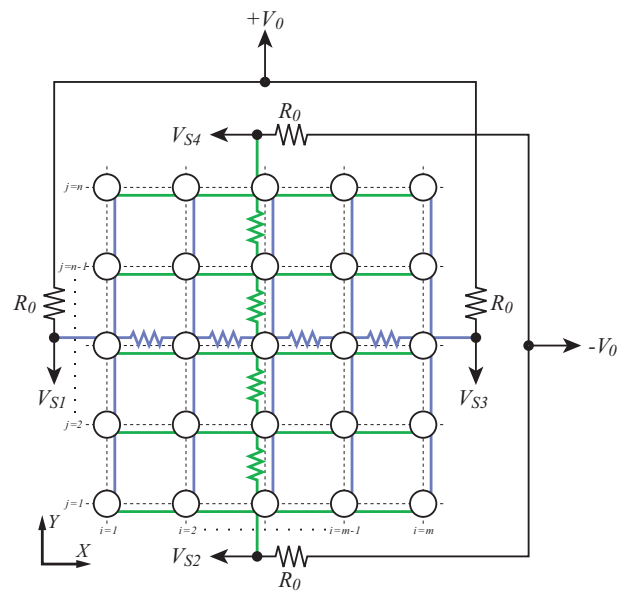


Fig. A.2 Coordinate of RNSP sensor output

関数として与えられる．

$$x_e(i) = \frac{2i - m - 1}{m - 1} \quad (\text{A.1})$$

$$y_e(j) = \frac{2j - n - 1}{n - 1} \quad (\text{A.2})$$

$$(-1 \leq x_e(i) \leq 1, -1 \leq y_e(j) \leq 1)$$

ここで，式(A.1)，(A.2)は等差数列であるから，定数 a, b, c, d を用いて

$$x(i, j) = ai + b \quad (\text{A.3})$$

$$y(i, j) = cj + d \quad (\text{A.4})$$

$$(a, b, c, d : \text{定数})$$

と表現することができ， x, y に関するラプラシアン $\nabla_x^2 x_e(i), \nabla_y^2 y_e(j)$ は以下の
ように計算される．

$$\begin{aligned} \nabla_x^2 x_e(i) &= x_e(i+1) + x_e(i-1) - 2x_e(i) \\ &= \{a(i+1) + b\} + \{a(i-1) + b\} - 2(ai + b) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

$$\begin{aligned} \nabla_y^2 y_e(j) &= y_e(j+1) + y_e(j-1) - 2y_e(j) \\ &= \{c(j+1) + d\} + \{c(j-1) + d\} - 2(cj + d) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

格子点に流れる電流

エレメント (i, j) を通りA層からB層へ流れる電流を $I(i, j)$ ，抵抗ネットワークの内部抵抗値を r ，外部抵抗値を R_0 ，電源電圧 $\pm V_0$ とする．また，A層，B層における各エレメント (i, j) の位置の電圧をそれぞれ V_a, V_b とすると，A層では y 軸方向に，B層では x 軸方向に並んだエレメント群が短絡していることから，それぞれ i または j のみに依存する関数として， $V_a(i), V_b(j)$ と表記できる．

このとき，第 i 番目の格子線上にある縦並びのエレメント群に流れる電流の総和 $\sum_{j=1}^n I(i, j)$ は， $i = 1, i = 2 \sim m - 1, i = m$ の各場合において，以下のようになる．

1) $i = 1$

$$\sum_{j=1}^n I(1, j) = \frac{1}{R_0}(V_0 - V_{S1}) + \frac{1}{r}(V_a(2) - V_{S1}) \quad (\text{A.7})$$

2) $i = 2 \sim m - 1$

$$\sum_{j=1}^n I(i, j) = \frac{1}{r}(V_a(i-1) + V_a(i+1) - 2V_a(i)) \quad (\text{A.8})$$

3) $i = m$

$$\sum_{j=1}^n I(m, j) = \frac{1}{R_0}(V_0 - V_{S3}) + \frac{1}{r}(V_a(m-1) - V_{S3}) \quad (\text{A.9})$$

また，第 j 番目の格子線上にある横並びのエレメント群に流れる電流の総和 $\sum_{i=1}^m I(i, j)$ は， $j = 1$ ， $j = 2 \sim n - 1$ ， $j = n$ の各場合において，以下のようになる

1) $j = 1$

$$\sum_{i=1}^m I(i, 1) = -\frac{1}{R_0}(-V_0 - V_{S2}) - \frac{1}{r}(V_b(2) - V_{S2}) \quad (\text{A.10})$$

2) $j = 2 \sim n - 1$

$$\sum_{i=1}^m I(i, j) = -\frac{1}{r}\{V_b(j-1) + V_b(j+1) - 2V_b(j)\} \quad (\text{A.11})$$

3) $j = n$

$$\sum_{i=1}^m I(i, n) = -\frac{1}{R_0}(-V_0 - V_{S4}) - \frac{1}{r}(V_b(n-1) - V_{S4}) \quad (\text{A.12})$$

電流の1次モーメント

ネット状近接覚センサに対象物が接近すると，赤外LEDから照射された光は対象物表面で反射され，各近接覚エレメントには反射光の照度分布に対応した電流 $I(i, j)$ が発生する．電流分布 $I(i, j)$ の x 方向の1次モーメント I_x を用いて，この電流分布の中心位置を求める．

$m \times n$ 直交格子状にエレメントが配置されている場合, x 方向の電流 1 次モーメント I_x は次のように表される.

$$I_x = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I(i, j) x_e(i) \quad (\text{A.13})$$

$$= \sum_{j=1}^n I(1, j) x_e(1) + \sum_{i=2}^{m-1} \sum_{j=1}^n I(i, j) x_e(i) + \sum_{j=1}^n I(m, j) x_e(m) \quad (\text{A.14})$$

式 (A.8) より,

$$\begin{aligned} I_x &= \sum_{j=1}^n I(1, j) x_e(1) + \sum_{j=1}^n I(m, j) x_e(m) \\ &\quad + \frac{1}{r} \sum_{i=2}^{m-1} (V_a(i+1) + V_a(i-1) - 2V_a(i)) x_e(i) \\ &= \sum_{j=1}^n I(1, j) x_e(1) + \sum_{j=1}^n I(m, j) x_e(m) \\ &\quad + \frac{1}{r} \sum_{i=2}^{m-1} (V_a(i) x_e(i+1) + V_a(i) x_e(i-1) - 2V_a(i) x_e(i)) \\ &\quad + \frac{1}{r} (V_a(1) x_e(2) - V_a(m-1) x_e(m) + V_a(m) x_e(m-1) - V_a(2) x_e(1)) \\ &= \sum_{j=1}^n I(1, j) x_e(1) + \sum_{j=1}^n I(m, j) x_e(m) \\ &\quad + \frac{1}{r} \sum_{i=2}^{m-1} V_a(i) (x_e(i+1) + x_e(i-1) - 2x_e(i)) \\ &\quad + \frac{1}{r} (V_a(1) x_e(2) - V_a(m-1) x_e(m) + V_a(m) x_e(m-1) - V_a(2) x_e(1)) \quad (\text{A.15}) \end{aligned}$$

式 (A.5) より,

$$\begin{aligned} I_x &= \sum_{j=1}^n I(1, j) x_e(1) + \sum_{j=1}^n I(m, j) x_e(m) \\ &\quad + \frac{1}{r} (V_a(1) x_e(2) - V_a(m-1) x_e(m) + V_a(m) x_e(m-1) - V_a(2) x_e(1)) \quad (\text{A.16}) \end{aligned}$$

ここで, $x_e(1)$, $x_e(m)$, $x_e(2)$, $x_e(m-1)$, $V_a(1)$, $V_a(m)$ は以下のように表すこ

とができる．

$$x_e(1) = -1 \quad (\text{A.17})$$

$$x_e(m) = 1 \quad (\text{A.18})$$

$$x_e(2) = -\frac{m-3}{m-1} \quad (\text{A.19})$$

$$x_e(m-1) = \frac{m-3}{m-1} \quad (\text{A.20})$$

$$V_a(1) = V_{S1} \quad (\text{A.21})$$

$$V_a(m) = V_{S3} \quad (\text{A.22})$$

上式及び式 (A.7), (A.9) を式 (A.16) に代入し，整理すると， x 方向の電流1次モーメント I_x は次のように求められる．

$$I_x = \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{r} \frac{2}{m-1} \right) (V_{S1} - V_{S3}) \quad (\text{A.23})$$

同様にして， y 方向の電流1次モーメント I_y を求める．

$$I_y = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I(i, j) y_e(j) \quad (\text{A.24})$$

$$= \sum_{i=1}^m I(i, 1) + \sum_{i=1}^m I(i, n) y_e(n) - \frac{1}{r} \{ V_b(1) y_e(2) - V_b(n-1) y_e(n) + V_b(n) y_e(n-1) - V_b(2) y_e(1) \} \quad (\text{A.25})$$

ここで， $y_e(1)$ ， $y_e(n)$ ， $y_e(2)$ ， $y_e(n-1)$ ， $V_b(1)$ ， $V_b(n)$ は以下のように表すことができる．

$$y_e(1) = 1 \quad (\text{A.26})$$

$$y_e(n) = -1 \quad (\text{A.27})$$

$$y_e(2) = \frac{n-3}{n-1} \quad (\text{A.28})$$

$$y_e(n-1) = -\frac{n-3}{n-1} \quad (\text{A.29})$$

$$V_b(1) = V_{S2} \quad (\text{A.30})$$

$$V_b(n) = V_{S4} \quad (\text{A.31})$$

上式及び式 (A.10), (A.12) を式 (A.25) に代入し, 整理すると, y 方向の電流 1 次モーメント I_y は次のように求められる.

$$I_y = - \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{r} \frac{2}{n-1} \right) (V_{S2} - V_{S4}) \quad (\text{A.32})$$

総電流量

センサ内を流れる総電流量 I_{all} を求める. 総電流量 I_{all} は, A 層から B 層へ流れる電流の総和であると同時に, 外付け抵抗 R_0 を通り A 層に流入する, または B 層から流出する電流量である. ゆえに, 電極電圧 V_{S1} , V_{S3} または V_{S2} , V_{S4} より以下のように求められる.

$$\begin{aligned} I_{all} &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I(i, j) \\ &= \frac{2V_0 - V_{S1} - V_{S3}}{R_0} \\ &= \frac{2V_0 + V_{S2} + V_{S4}}{R_0} \end{aligned} \quad (\text{A.33})$$

電流分布の中心位置

電流分布の中心位置 x_c , y_c は電流分布の 1 次モーメントを総電流量で除することで求められ, 以下のようになる.

$$x_c = \frac{I_x}{I_{all}} = \left(1 + \frac{R_0}{r} \frac{2}{m-1} \right) \left(\frac{V_{S1} - V_{S3}}{2V_0 - V_{S1} - V_{S3}} \right) \quad (\text{A.34})$$

$$y_c = -\frac{I_y}{I_{all}} = \left(1 + \frac{R_0}{r} \frac{2}{n-1} \right) \left(\frac{V_{S2} - V_{S4}}{2V_0 - V_{S1} - V_{S3}} \right) \quad (\text{A.35})$$

付 録 A

PA10アームのモータドライバとの通信仕様

三菱重工業が公開しているC言語ベースのPA10制御ライブラリにはモータドライバとの通信プロトコルや起動シーケンスが標準実装されている。しかしながら、ライブラリ内部の詳細は公開されていないため、Matlab/SimulinkベースでPA10制御システムを構築するにあたって、新たに通信プロトコルと起動シーケンスのプログラミングを行った。なお、これらは、叶の修士論文の成果である。

以降では、PA10-7Cアームのモータドライバが採用している通信方式を述べ、通信プロトコル、起動シーケンスについて述べる。

A.1 ARCNET 通信

ARCNET (acronym of Attached Resource Computer Network) とは、ロボット制御において重要なリアルタイム制御に適した信号衝突の少ないトークンパッシング方式の通信手法 (LAN) である。一本のケーブルに接続された幾つものノードのそれぞれに対して順番にトークン (送信権) が渡され、一度にケーブルを通過する信号は1つに限られるため信号衝突によるデータの消失がない。またノード数最大の255まで増えても通信の効率が低下せず確定的な動作が得られる信頼度の高い通信方式である。80年代に盛んに使われ、現在ではEthernetやCAN通信に取って代わられたが、今なお重工系製品では通信の安定性が評価され使用されている。PA10アームはこの通信方式をPA10ドライバと制御器の間で使用している。PA10ドライバとdSPACE間を接続するときにARCNETモジュールボード (DS4201) を用いる。ARCNETモジュール

ルボードはdSPACE社が提供するARCNET通信を行うためのdSPACE制御器に搭載する拡張モジュールである。同様のARCNET通信モジュールはPA10のドライバ側にもあり、その間をARCNET通信専用のケーブルで繋ぐことで、dSPACEとPA10アーム間でARCNET通信を行い、角速度制御値や角度フィードバック値などの制御入出力データを送受信することでPA10の制御を行う。ARCNETボードには2チャンネル分の通信機能を備えている。試作段階では、2チャンネルそれぞれを内部で仮想的に上位コントローラと下位コントローラとして定義し、互いに接続し通信の確認を行った。

A.2 ARCNET通信ケーブルと配線図

ARCNETボードの中でチャンネル1を上位コントローラ、チャンネル2を下位コントローラとする。チャンネル1, 2のARCNETボードの出力ピンは内部で、ARCNET通信用トランシーバHYC4000の出力信号と表A.1のように接続されている。また、ARCNETボードの出力ピンからARCNET通信専用ケーブルのRJ-11コネクタに接続するための変換アダプタを作成した。図A.2に示すようにコネクタの断面をコネクタの末端側から奥の配線側方向に見て最も左のピンから1-6と番号を振り、その3, 4ピンに、チャンネル1は表A.2のように信号PH-A \leftrightarrow ピン4, 信号PH-B \leftrightarrow ピン3と信号線を結線し、チャンネル2は表A.2のように信号PH-A \leftrightarrow ピン3, 信号PH-B \leftrightarrow ピン4と信号線を結線した。このメス・コネクタの間を図A.2に示すように、両端がオス・コネクタのARCNET専用通信ケーブルで接続した。このような配線した意図として、上位コントローラであるチャンネル1はdSPACEコントローラの役目を果たし、下位コントローラであるチャンネル2はPA10ドライバ側のコネクタ仕様と同じにしている。注意として、ARCNETは10kHzの高周波信号を扱うため、その信号は通信ケーブルの両端で跳ね返りやケーブルのインピーダンス整合がとれないことによって減衰し、通信が安定的に行えないことがある。そのため、ARCNET専用通信ケーブルはSMSC社の内部インピーダンス120 Ω 5mの通信品質の良い専用ケーブルを用い、信号の跳ね返りを防ぐためにケーブルの端に同じく120 Ω 終端抵抗を付加した(PA10ドライバはもとより付け

てあり，dSPACE 側に新たにつけた).

ARCNET ボードの通信確認のためにチャンネル1とチャンネル2を接続し，デモプログラム (dsarcnet¥demo) を用いて行った結果，入力波形と出力波形がほぼ遅れなく重なり，正しく通信していることを確認した.

Table A.1 Internal wiring of ARCNET module board (DS4201)

HYC4000 signal		DS4201 signal	Pin number of DS4201
PH-A	⇔	CON+	1(CH1), 2(CH2)
PH-B	⇔	CON-	18(CH1), 19(CH2)

Table A.2 Wiring of adapter cables (CH1)

DS4201 signal	Pin number of DS4201		Pin number of RJ-11 (female connector)
PH-A	1(CH1)	⇔	4
PH-B	18(CH1)	⇔	3

Table A.3 Wiring of adapter cables (CH2)

DS4201 signal	Pin number of DS4201		Pin number of RJ-11 (female connector)
PH-A	2(CH2)	⇔	3
PH-B	19(CH2)	⇔	4

A.3 PA10 アーム制御の状態遷移と制御コマンド

ARCNET は0 から 507 バイトの中で可変の packet サイズを送受信可能で，通信レートは 2.5 Mbps から 10 Mbps の間で選択できるため，ショートメッセージと呼ばれる信号の高速通信に適している．ここでは ARCNET 通信される

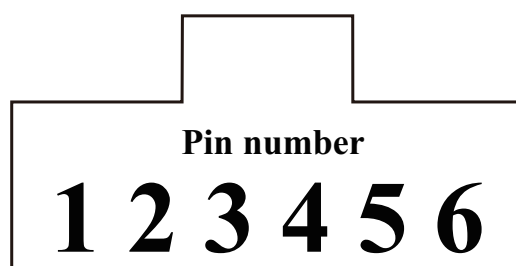
PA10 Servo Driver**ARCNET female connector**

Fig. A.1 Pin number of RJ-11

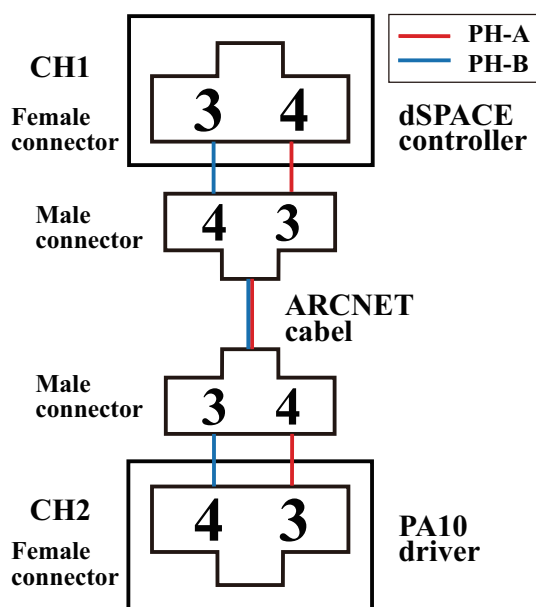


Fig. A.2 Wiring of ARCNET cable

メッセージについて詳しく述べる．各ノードのデバイスが持つ通信ICには最大255個までの個別のMACアドレスが割り振られる．通信されるメッセージはショートパケットとロングパケットに分かれ，どちらかを使用するかはモードによって選択できる．ショートパケットは0から255バイトで，ロングパケットは256から507バイトである．ショートパケットのみを用いる場合253, 254, 255バイトは送信してはいけない．

A.3.1 概要

PA10ドライバの初期状態で通信レートは10MHz, トランシーバICのMACアドレスは254 (16進数FE)に設定されている．今回はこの設定を変更することなく使用し, dSPACEのARCNETボードのMACアドレスは255(16進数FF)に設定した．PA10アームは通信にショートパケットのデータ送信を使用しており, 送信データのフォーマットを図A.3に示す．PA10アームで通信されるショートパケットは, 図A.3に示すように以下の6要素から構成される．

1. 送信側MACアドレス
2. 受信側MACアドレス
3. シーケンシャル・ナンバーのアドレス
4. シーケンシャル・ナンバー
5. データ・タイプ
6. 制御データ

ショートパケットの初めの2バイト分は, それぞれ送信側と受信側の順でMACアドレスに当たるノード番号が割り振られ, 3バイト目にシーケンシャル・ナンバーのアドレスである．シーケンシャル・ナンバーは送信データと受信データの整合性をとるために通信されるごとにカウントアップされる値で, 送信データと受信データは同じシーケンシャル・ナンバーを持つ．このシーケンシャル・ナンバーは制御データの先頭の1つ前のアドレスに位置

し、シーケンシャル・ナンバー・アドレスはその位置を示すものである。制御データの最初に当たるのがデータ・タイプと呼ばれる制御コマンドである。この制御コマンドは‘S’、‘E’、‘C’などがあり、制御コマンドを切り替えることによって図A.4のようにPA10サーボドライバの制御が切り替わる。具体的に、‘S’はスタートで制御開始コマンド、‘E’はエンドで制御終了コマンド、‘C’はコントロール動作中の制御データ・コマンドで、それぞれのコマンドに付随してパケットの制御データのフォーマットが決められている。制御コマンド‘C’はコントロール・データとともに送信され、決められた時間(100ms)ごとに送信されなければならない。制御コマンド‘S’が実行されるとタイマーが開始され、その後は制御コマンド‘C’が定期的を送信されるかがチェックされる。制御コマンド‘C’が決められた送信間隔を超えて送信された場合は、アラーム信号が上がりロボットは停止する。そのため通常のコマンドの流れは‘S’、‘C’、—、‘C’、‘E’となる。また、上位制御器からPA10サーボドライバに制御コマンドが送信されると、それに呼応するように受信確認と制御フィードバックするために同じコマンドをPA10サーボドライバから上位制御器に送り返す。例として、制御コマンド‘C’の制御データの詳細を述べる。上位制御器からPA10サーボドライバに制御コマンド‘C’を送信する場合、44バイトのコントロール・データが送信される。このコントロール・データは6バイトずつの制御データが7軸分と2バイトの総括データで成り立つ。各軸の制御データは以下の要素で成り立つ。

初めの2バイト

1. サーボのON/OFF
2. ブレーキ
3. トルク制御/速度制御の切り替え等

次の4バイト

1. トルク
2. 速度指令値等

一方PA10サーボドライバから上位制御器に制御コマンド‘C’を送信する場合、72バイトのコントロール・データが送り返される。コントロール・データは10バイトずつの制御データが7軸分と2バイトの総括データで成り立つ。各軸かりの返送される制御データ(フィードバック値)は以下の要素で成り立つ。

1. 各軸の状態(サーボのON/OFF, ブレーキ等)
2. 関節角度
3. 現在速度
4. 現在トルク値

詳しくはサーボドライバ取扱説明書に記載してある。以上のように、制御コマンドとそれに付随するコントロール・データを生成することでPA10を制御することができる。特に制御モードは速度制御やトルク制御を設定できるのだが、製品版の上位制御器(モーション・コントロール・PCIボードとPAライブラリ)では、トルク等の細かい設定にアクセスすることができない。そのため自作の上位制御器を用いることで、詳細に制御モードの設定が可能になることがメリットである。

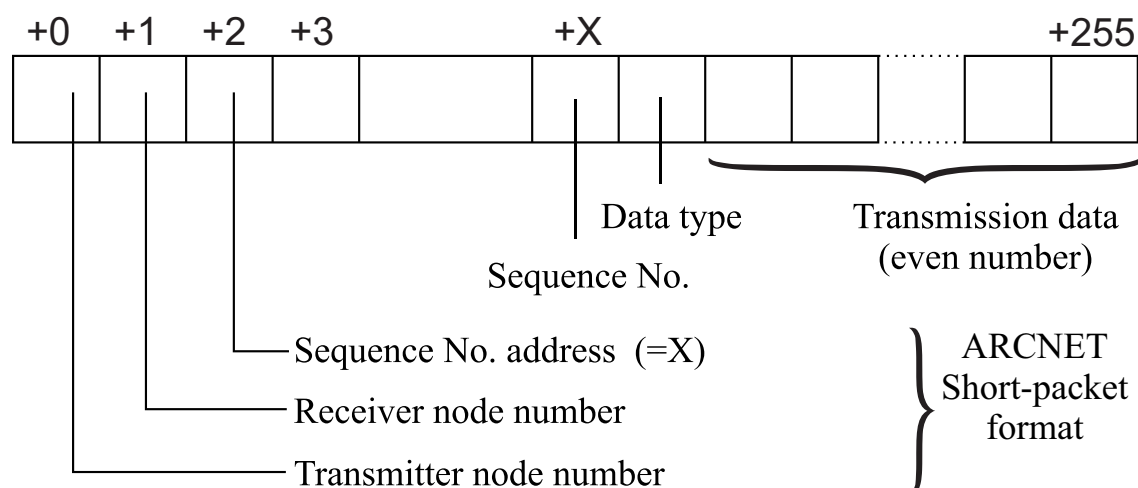


Fig. A.3 Data format of ARCNET

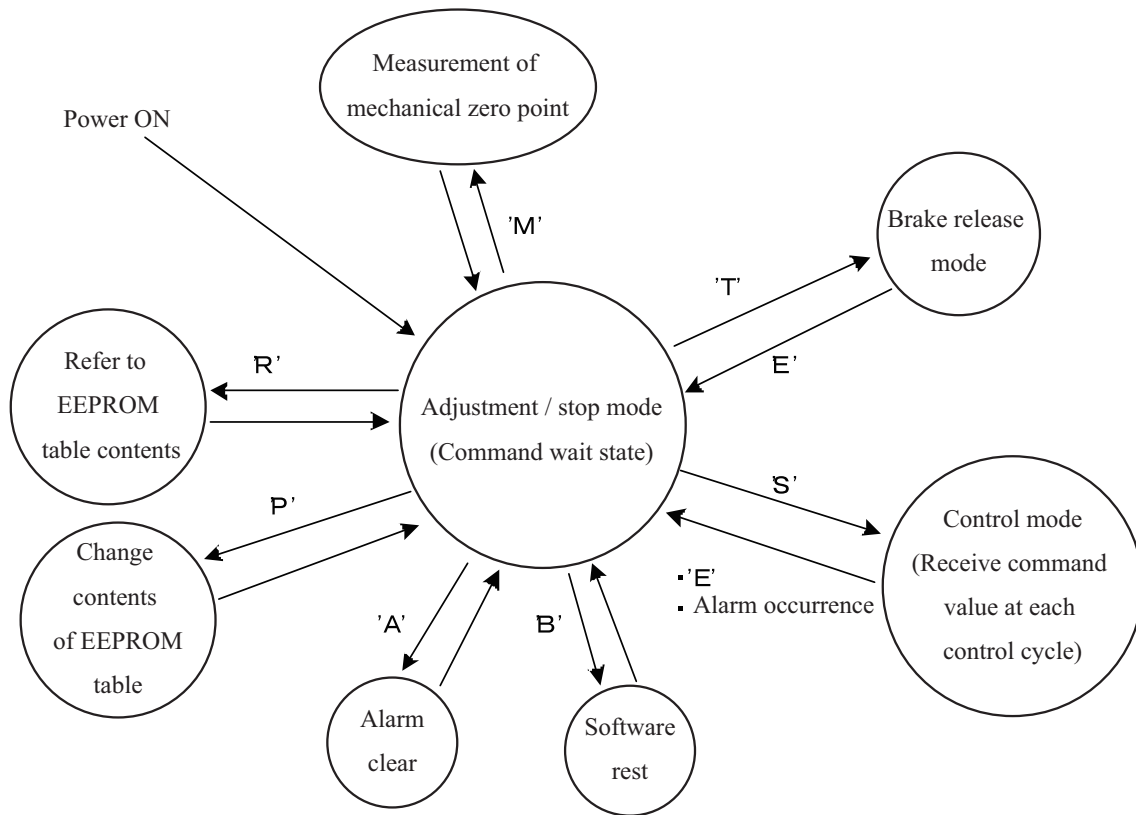


Fig. A.4 PA10 arm servo driver control state transition

A.3.2 制御コマンドCに関する詳細

特に重要なロボット動作の制御値の通信を行う制御コマンド‘C’の送受信コントロール・データについて述べる。

はじめに上位コントロールからサーボドライバに送信されるコントロール・データのフォーマットを図A.5に示す。各軸の制御データの最初の2バイトは制御状態を設定するもので、メカニカルブレーキ:0(OFF), サーボ:1(ON), 制御モード:0(速度制御), 他軸へのアラームの有効性:0(無効)と実際の制御では設定した。5,6バイト目の制御データは速度制御値である。送信される速度制御値は次式によって計算される。

$$Q_v [\text{digit}] = q_v [\text{rad/s}] * 5000 \quad (\text{A.1})$$

入力された角速度値 $q_v[\text{rad/s}]$ に対して規定値5000を乗ずることで送信値

$Q_v[digit]$ に変換する．ここでこの変換された値は2バイト分であるが，送信する場合は1バイトずつ送信する．そのときの送信順序と分割方法は図A.9に示す．2バイトの連続データを送信する場合，bit15-8までビット番号の大きい方から小さい方へ順に並べたものを1バイト目のデータとして，bit7-0も同様の順で2バイト目のデータとして分割し送信する．複数バイトのデータはすべてこのルールに則り扱う．これらの処理は制御信号をサーボドライバの要求する形式にコーディングする操作に当たる．

次にサーボドライバから上位コントロールに送信されるコントロール・データのフォーマットを図A.6に示す．各軸のフィードバック・データ中で最初の2バイトは制御状態を表すもので，その詳細を図A.7に示す．実際にロボットを動作させる場合安全に動作が行われているかを監視することは重要である．そこで，この制御状態出力status変数として図A.7の最も左の行のように9つの要素を出力し監視を行えるようにした．同様に図A.8に示すように通信統括CPUステータスについても同様に監視を行う．2-6バイト目の返信データは関節角度値である．返信される関節角度値は32bit符号付きデータに変換した後，次式によって計算される．

$$q[\text{rad/s}] = Q[\text{digit}] * \frac{360}{2^{14} * 50} * \frac{\pi}{180} \quad (\text{A.2})$$

入力された角速度値 $Q[digit]$ に対して各関節のレゾルバ分解能が14bitであり，規定値50を利用すると式A.2のように関節角度値が求められる．これらの処理はサーボドライバの出力する形式から実際に制御に使用する信号にデコーディングする操作に当たる．

A.3.3 PA10 アーム制御の状態遷移

図A.4に表した状態遷移をSimulinkプログラム上で，Stateflowを用いて図のように状態遷移をdSPACE社の基本プログラムに改修を加えた状態遷移プログラムを構築した．改修として，タートコマンド'S'を送信し制御モードを開始するステートの中で，アラーム解除処理を加えた．エムアンドシー

Transmission data content		Bytes	
Driver No.1 Joint of θ_{S1}	Bit 0 : Mechanical brake ON/OFF	2	... 1: ON, 0: OFF
	Bit 1 : Servo ON/OFF		... 1: ON, 0: OFF
	Bit 2 : Torque / speed switching		... 1: Torque, 0: Velocity
	Bit 3 :		
	Bit 4 : Effectiveness of alarm to other axis		... 1: Enable, 0: Disable
	Bit 5 :	2	
	...		
	Bit 15 :		
	Torque command value	2	... Rated torque = 1000H
Driver No.2 Joint of θ_{S2}	Joint angular velocity command value	2	... 1 rad/s = 5000
	and so on		
	...		
Driver No.7 Joint of θ_{W2}	...		
	...		
Communication control CPU	Bit 0 :	2	... 1: Enable, 0: Disable
	...		
	Bit 2 :		
	Bit 3 : Dead man switch enable		
	Bit 4 :		
	...		
	Bit 15 :		

Fig. A.5 control data: from host controller to servo driver

Transmission data content		Bytes
Driver No.1 Joint of θ_{s1}	Servo CPU status	2
	Joint angle	4
	Current speed	2
	Current torque	2
Driver No.2 Joint of θ_{s2}	and so on	
	⋮	⋮
Driver No.7 Joint of θ_{w2}		
Communication control CPU	Communication control CPU status	2

... 360 degree = 4000H × 50

Fig. A.6 Reply data: from servo driver to host controller

システムのアーキネット・プロトコル・アナライザを用いて、従来のPC制御器を用いてPA10アームを動作させたときのアーキネットパケットの監視を行った。その結果制御モードを開始する際、コマンドの流れは‘S’、‘C’の前にアラーム解除を加えた‘A’、‘S’、‘C’の流れであることがわかった。そこで、アラーム解除の2バイト分の制御データに16進数で0000H, 0001H, 0002H, …… , 0007Hまでの8つのデータを送信し、全CPUアラームを解除した後に‘S’、‘C’の順で制御を開始することで動作することに成功した。

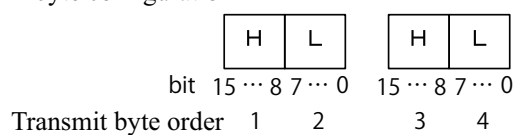
status	bit	Contents		Behavior under abnormal conditions
1	bit15	Servo ON/OFF	1 OFF	
			0 ON	
2	bit14	Control mode	1 Not under control	
			0 Under control	
3	bit13			
4	bit12			
5	bit11 bit4	Alarm type	0x00 Normal	Do not enter control mode
			0x01 Error of shared memory	
			0x02 Error of EEPROM	
			0x04 Error of CPU	Brake ON / servo OFF
			0x05 Communication cycle error of communication control CPU	
			0x06 Error of speed deviation	
			0x07 Error of resolver deviation	
			0x08 Error of position limit over	
			0x09 Error of motor torque	
			0x0A Error of IPM	
			0x0B Error of brake disconnection / short	
			0x0C Error of resolver disconnection / short (motor side)	
			0x0D Error of resolver disconnection / short (gear side)	
			0x0E Error of overcurrent	
			0x0F Error of overvelocity	
			0x10 Error of other CPU	
			0x11 Emergency SW ON	When an error occurs, Servo lock → Brake ON (after a certain period of time) → Servo OFF (After a certain period of time)
			0x12 Dead-man SW OFF	
			0x13 Limit SW ON	
			0xFF Communication cycle error	
6	bit3			
7	bit2			
8	bit1	- Side drive prohibited state	1 Angle (-) side limit ON	- Side drive prohibited
			0 Normal	
9	bit0	+ Side drive prohibited state	1 Angle (+) side limit OFF	+ Side drive prohibited
			0 Normal	

Fig. A.7 Reply data: table of Serbo CPU status

status	bit	Contents			Behavior under abnormal conditions
1	bit15				
2	bit14	Control mode	1	Not under control	
			0	Under control	
3	bit13	Status of limit SW	1	OFF	
			0	ON	
4	bit12	Status of teaching SW	1	ON	
			0	OFF	
5	bit11 bit4	Alarm type	0x00	Normal	Do not enter control mode
			0x02	Error of EEPROM	
			0x03	Initialization Error of ARCNET	
			0x04	Error of CPU	Transition to adjust / stop mode
			0x05	Communication cycle error of host controller	
			0x06	Error of power supply temperature	
			0x07	Error of 100V output	
			0x10	Error of other CPU	Transition to adjust / stop mode
			0x11	Emergency SW ON	
			0x12	Dead-man SW OFF	
			0x13	Limit SW OFF	
6	bit3	Status of emergency stop SW	1	Emergency SW OFF	
			0	Emergency SW ON	
7	bit2	Status of 100 V output	1	100 V power output in progress	
			0	100 V power output stopped	
8	bit1	Power supply temperature condition	1	Error of power supply temperature	
			0	Normal	
9	bit0	Status of dead-man SW	1	Dead-man SW ON	
			0	Dead-man SW OFF	

Fig. A.8 Reply data: table of communication supervision CPU status

■ 2 byte configuration



■ 4 byte configuration

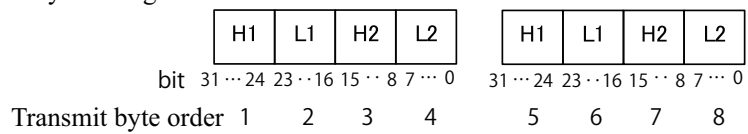


Fig. A.9 Transmission order and division method of 2/4 bytes data

関連論文の印刷公表の方法及び時期

学術雑誌論文

1. 小山 佳祐, 鈴木 陽介, 明 愛国, 下条 誠, “指先に近接覚センサを備えたロボットハンドによるプリグラスプ制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 9, pp. 712–722(11 頁), 2015
(第 3 章, 5 章, 6 章に関係する).
2. 小山 佳祐, 鈴木 陽介, 明 愛国, 下条 誠, “指先に光学式近接覚センサを備えた多指ハンドによる同時接触での把持 (物体表面の反射率推定とセンサ出力の補正)”, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 833, DOI:<http://doi.org/10.1299/transjsme.15-00366>(13 頁), 2016
(第 7 章前半に関係する).

国際会議発表論文（査読付き）

1. K. Koyama, H. Hasegawa, Y. Suzuki, A. Ming and M. Shimojo,
“Pre-Shaping for Various Objects by the Robot Hand Equipped with Resistor Network Structure Proximity Sensor”,
IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 4027–4033, Tokyo, 2013.11
(第 3 章, 5 章, 6 章に関係する).
2. Y. Suzuki, K. Koyama, A. Ming and M. Shimojo,
“Grasping Strategy for Moving Object Using Net-Structure Proximity Sensor and Vision Sensor”,
IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 1403–1409, Seattle, 2015.5
(第 6 章に関連する).

3. K. Koyama, Y. Suzuki, A. Ming, and M. Shimojo,
“Grasping Control Based on Time-To-Contact Method for a Robot Hand Equipped
with Proximity Sensors on Fingertips,
IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS),
pp. 504–510, Hamburg, 2015.9
(第 7 章後半に関係する).
4. K. Koyama, Y. Suzuki, A. Ming, and M. Shimojo,
Integrated Control of a Multi-fingered Hand and Arm using Proximity Sensors on
the Fingertips,
IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 4282–
4288, Stockholm, 2016.5
(第 8 章に関係する).

国内学会発表（査読なし）

1. 小山佳祐，向山由宇，叶沙，鈴木陽介，明愛国，下条誠，
“すべり・近接覚を統合したロボットハンドによるハンドリングに関する研究－人間との物体受け渡し動作について－”，
ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH), 1P1-I03, 静岡，2012.5.
2. 小山佳祐，長谷川浩章，鈴木陽介，明愛国，下条誠，
“指先に近接覚センサを備えたロボットハンドによるプリシェイピング
フィーードバック過程を有利にするセンサ特性に基づく姿勢・距離同時制御－”，
第 13 回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
(SICE SI), 2L2-1, 福岡，2012.12.
3. 小山佳祐，鈴木陽介，明愛国，下条誠，
“触覚・近接覚センサを搭載したロボットハンドによる物体把持の研究－
接触状態における近接覚センサの出力利用に関する検討－”，
ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH), 1A1-K07, 茨城，2013.5.

4. 瀬戸川 雅夫, 小山 佳祐, 鈴木 陽介, 明 愛国, 下条 誠,
“視覚・近接覚を統合したロボットハンドによる対象物把持に関する研究ー近接フィードバックを有利にするための視覚情報の検討ー”,
ロボティクス・メカトロニクス講演会(ROBOMECH), 1A1-K08, 茨城, 2013.5.
5. 小山 佳祐, 鈴木 陽介, 明 愛国, 下条 誠,
“ネット状近接覚センサを搭載したロボットハンドによる指先同時接触のための距離推定手法”,
第31回 日本ロボット学会 学術講演会(RSJ), 3G3-08, 東京, 2013.9.
6. 鈴木 陽介, 叶 沙, 小山 佳祐, 瀬戸川 将夫, 明 愛国, 下条 誠,
“近接覚を有するインテリジェントロボットハンドの研究”,
第31回 日本ロボット学会 学術講演会(RSJ), 3G3-05, 東京, 2013.9.
7. 小山 佳祐, 鈴木 陽介, 明 愛国, 下条 誠,
“触覚・近接覚を搭載したロボットハンドの開発”,
第14回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会(SICE SI), 2C3-3, 兵庫, 2013.12.
8. 鈴木 陽介, 瀬戸川 将夫, 小山 佳祐, 明 愛国, 下条 誠,
“ネット状近接覚センサを有するロボットハンドシステムにおける視覚センサ情報の利用に関する検討”,
第14回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会(SICE SI), 2C3-2, 兵庫, 2013.12.
9. 小山 佳祐, 鈴木 陽介, 明 愛国, 下条 誠,
“近接覚フィードバック制御に基づくロボットハンドの知能化に関する研究”,
ロボティクス・メカトロニクス講演会(ROBOMECH), 3P2-S02, 富山, 2014.5.
10. 佐々井 亮太, 小山 佳祐, 鈴木 陽介, 下条 誠,
“遠隔操作での近接制御を用いたロボットハンドによる物体把持に関する研究”,
ロボティクス・メカトロニクス講演会(ROBOMECH), 3P2-R05, 富山, 2014.5.

11. 岡部 信吾, 小山 佳祐, 鈴木 陽介, 明 愛国, 下条 誠, “近接覚を付与したロボットハンドによる移動物体把持に関する研究”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH), 3P2-R06, 富山, 2014.5.
12. 小山 佳祐, 鈴木 陽介, 明 愛国, 下条 誠,
“物体形状に倣うロボットハンドの開発—近接覚センサを用いた多指ハンドとアームの協調制御によるプリグラスプ動作について—”,
第15回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SICE SI), 3L1-3, 東京, 2014.12.
13. 鈴木 陽介, 小山 佳祐, 明 愛国, 下条 誠,
“ネット状近接覚センサを有するロボットハンドシステムによる視覚センサ情報を統合した物体把持”, 第15回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SICE SI), 3L1-4 東京, 2014.12.
14. 久松和樹, 小山 佳祐, 鈴木 陽介, 明 愛国, 下条 誠,
“指先近接覚センサを用いた未知形状物体にならう RC サーボを用いたモジュール型ロボットハンド”,
ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH), 1P2-N08, 2015.5.

参考文献の印刷公表の方法及び時期

学術雑誌論文

1. Hiroaki Hasegawa, Yosuke Suzuki, Aiguo Ming, Keisuke Koyama, Masatoshi Ishikawa, and Makoto Shimojo, “Net-Structure Proximity Sensor: High-Speed and Free-Form Sensor With Analog Computing Circuit”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 20, No. 6, pp.3232-3241, 2015 (近接覚の基本原理に関係する).

著者略歴

小山 佳祐（こやま けいすけ）

1989年12月22日 和歌山県に生まれる

2010年3月 和歌山工業高等専門学校
機械工学科 卒業

2010年4月 電気通信大学 電気通信学部
知能機械工学科 編入学

2013年3月 同上 卒業

2013年4月 電気通信大学大学院 情報理工学研究科
知能機械工学専攻 博士前期課程 入学

2015年3月 同上 修了

2015年4月 電気通信大学大学院 情報理工学研究科
知能機械工学専攻 博士後期課程 入学

2017年3月 電気通信大学大学院 情報理工学研究科
知能機械工学専攻 博士後期課程 修了予定

2015年4月より，日本学術振興会特別研究員（DC1）として，近接覚を備えた
ハンド研究に従事．日本機械学会，日本ロボット学会，計測自動制御学会会
員．

平成28年度博士論文

近接覚を用いた
反射動作に基づく
ハンド・アーム統合制御による把持

電気通信大学

情報理工学研究科

知能機械工学専攻

明研究室

小山 佳祐

提出年月日

2017年3月24日
